

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 642 489**

51 Int. Cl.:

**E02F 3/84** (2006.01)

**E01C 19/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.08.2011 PCT/US2011/001423**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.09.2012 WO12125134**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.08.2011 E 11746053 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.05.2017 EP 2686491**

54 Título: **Sistema de control de inclinación de pala automático para una máquina de movimiento de tierras**

30 Prioridad:

**16.03.2011 US 201161453256 P**  
**21.07.2011 US 201113187831**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**16.11.2017**

73 Titular/es:

**TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC. (100.0%)**  
**7400 National Drive**  
**Livermore, CA 94551, US**

72 Inventor/es:

**KONNO, HIROYUKI;**  
**BRABEC, VERNON JOSEPH y**  
**GRAHAM, RENARD TOMAS**

74 Agente/Representante:

**ZUAZO ARALUZE, Alexander**

ES 2 642 489 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**SISTEMA DE CONTROL DE INCLINACIÓN DE PALA AUTOMÁTICO PARA UNA MÁQUINA DE MOVIMIENTO DE TIERRAS**

**DESCRIPCIÓN**

- 5 **Antecedentes de la invención**
- La presente invención se refiere generalmente a máquinas de movimiento de tierras y más particularmente a un control de inclinación de pala automático.
- 10 Las máquinas de construcción denominadas máquinas de movimiento de tierras se usan para conformar una parcela de terreno en un perfil del suelo deseado. Ejemplos de máquinas de movimiento de tierras incluyen buldócers y motoniveladoras. Los buldócers se usan principalmente para el movimiento grueso de tierra: las motoniveladoras se usan principalmente para el control fino del perfil del suelo final. Los buldócers y las
- 15 motoniveladoras están equipados con una pala para mover tierra. La posición de pala y la situación de pala son ajustables. La posición de pala puede especificarse mediante parámetros tales como elevación de pala y desplazamiento lateral de pala. La situación de pala puede especificarse mediante parámetros tales como ángulo de basculación de pala y ángulo de inclinación de pala.
- 20 La posición de pala y la situación de pala están controladas a menudo manualmente por un operario de máquina. Para mejorar la precisión y la velocidad de operación, es deseable el control automático. Se han empleado diversos sistemas de control automáticos. Estos varían en complejidad, coste, número de parámetros controlados, tiempo de respuesta y precisión. El documento US 2009/0069987 A1 da a conocer un método y un aparato para controlar el
- 25 ángulo de elevación de pala y de inclinación de pala de una pala empujadora. Las mediciones de ángulo de elevación y de inclinación se calculan a partir de mediciones recibidas desde una antena de sistema satélite de navegación global (GNSS) y una unidad de medición inercial montada sobre la pala empujadora. La unidad de medición inercial incluye tres acelerómetros situados ortogonalmente y tres girómetros proporcionales situados ortogonalmente. Las mediciones se procesan mediante algoritmos para calcular estimaciones de la elevación de
- 30 pala, la velocidad vertical de pala, el ángulo de inclinación de pala y la velocidad angular de inclinación de pala. Estas estimaciones se proporcionan entonces como entradas para un algoritmo de control que proporciona señales de control para controlar un sistema hidráulico de empuje que controla la elevación de pala y el ángulo de inclinación de pala.
- 35 **Breve resumen de la invención**
- La invención se define en las reivindicaciones independientes 1,13 y 14. Se definen realizaciones preferidas en las reivindicaciones dependientes. Una pala montada sobre un vehículo se controla automáticamente basándose en las mediciones recibidas desde un giroscopio de tres ejes y dos sensores de pendiente montados sobre la pala. Las mediciones del giroscopio de tres ejes incluyen mediciones de velocidad angular alrededor de tres ejes ortogonales.
- 40 Las mediciones de los dos sensores de pendiente incluyen un ángulo de inclinación de pala y un ángulo de basculación de pala. Las mediciones del giroscopio de tres ejes y de los dos sensores de pendiente se combinan. El giroscopio de tres ejes y los sensores de pendiente no están sincronizados. Los algoritmos para la combinación apropiada de las mediciones representan la secuencia temporal de las mediciones. Una medición de un sensor de pendiente no se combina con las mediciones del giroscopio de tres ejes si la medición del sensor de pendiente es más antigua que las mediciones del giroscopio de tres ejes. Una medición de un sensor de pendiente tampoco se combina con las mediciones del giroscopio de tres ejes si la medición del sensor de pendiente no es válida debido a perturbaciones mecánicas.
- 45 Una estimación del ángulo de inclinación de pala se computa a partir de las mediciones combinadas apropiadamente. El ángulo de inclinación de pala se controla basándose en un ángulo de inclinación de pala de referencia y la estimación computada del ángulo de inclinación de pala. Puede usarse un algoritmo de control derivado proporcional o un algoritmo de control proporcional.
- 50 Pueden almacenarse algoritmos de procesamiento de datos y algoritmos de control como código ejecutable por ordenador almacenado en un medio legible por ordenador y ejecutado por un sistema de computación. Una señal de control emitida por el sistema de computación puede controlar un sistema hidráulico que controla el ángulo de inclinación de pala.
- 55 Estas y otras ventajas de la invención resultarán evidentes para los expertos habituales en la técnica mediante la referencia a la descripción detallada y a los dibujos adjuntos siguientes.
- 60 **Breve descripción de los dibujos**
- Las figura 1A y la figura 1B muestran una vista lateral y una vista desde arriba, respectivamente, de una motoniveladora;
- 65

la figura 2 muestra sistemas de coordenadas de referencia;

la figura 3A y la figura 3B muestran la definición de ángulo de inclinación de pala y el ángulo de basculación de pala, respectivamente;

la figura 4A y la figura 4B muestran dos configuraciones de montaje para una unidad de sensor;

la figura 5A muestra un esquema de un algoritmo derivado proporcional de control para el control de inclinación de pala automático;

la figura 5B muestra un esquema de un algoritmo de control proporcional para el control de inclinación de pala automático;

la figura 6A muestra un esquema de un módulo estimador de inclinación de pala para un algoritmo derivado proporcional de control;

la figura 6B muestra un esquema de un módulo estimador de inclinación de pala para un algoritmo de control proporcional;

de la figura 7A a la figura 7C muestran diagramas de flujo de un método para el procesamiento de sensor; y

la figura 8 muestra un esquema de un sistema de computación para implementar un sistema de control de inclinación de pala automático.

### Descripción detallada

Las máquinas de movimiento de tierras, tales como buldócers y motoniveladoras, están equipadas con una pala para mover tierra. La posición de pala y la situación de pala se controlan para conformar el suelo hasta un perfil deseado. La posición de pala y la situación de pala pueden controlarse manualmente por un operario de máquina o automáticamente por un sistema de control de pala automático. A menudo, se usan combinaciones de control manual y automático. Los parámetros de pala situados bajo control automático dependen de la aplicación, tipo de máquina de movimiento de tierras, precisión deseada, tiempo de respuesta, y la complejidad y coste del sistema de control automático.

Para una motoniveladora, los parámetros principales de pala que van a controlarse son el ángulo de inclinación de pala y la elevación de pala. La figura 1A y la figura 1B muestran una vista lateral y una vista desde arriba, respectivamente, de una motoniveladora 100. La motoniveladora 100 incluye un motor 102, una cabina 104 y una estructura 106 de chasis frontal. El motor 102 está ubicado en la parte posterior de la motoniveladora 100 y la estructura 106 de chasis frontal está ubicada en la parte frontal de la motoniveladora 100. Un operario de máquina (no mostrado) se sienta en la cabina 104 y hace funcionar la motoniveladora 100.

Una barra 108 de enganche está conectada a la estructura 106 de chasis frontal por medio de una unión de rótula, y una pala 110 está montada sobre la barra 108 de enganche. La barra de enganche también está conectada a tres cilindros hidráulicos: el cilindro 112 de levantamiento derecho, el cilindro 114 de levantamiento izquierdo, y el cilindro 116 de desplazamiento central. Obsérvese que: "derecho" y "izquierdo" se especifican con respecto al operario de máquina. Los tres cilindros hidráulicos están conectados a la estructura 106 de chasis frontal por medio de un acoplamiento 118. El ángulo de elevación y el de inclinación de la pala 110 se controlan mediante el centro 112 de levantamiento derecho y el centro 114 de levantamiento izquierdo. El cilindro 116 de desplazamiento central se usa para desplazar lateralmente la barra 108 de enganche en relación con la estructura 106 de chasis frontal. El ángulo de basculación de la pala 110 se controla mediante un cuarto cilindro hidráulico, denotado como el cilindro 120 de control de ángulo de basculación de pala. El ángulo de inclinación de pala y el ángulo de basculación de pala se describen con más detalle a continuación.

La figura 2 muestra los marcos de referencia usados en los algoritmos de control descritos a continuación. El marco 210 de navegación es un sistema de coordenadas cartesianas usado como marco de navegación local. El origen del marco 210 de navegación se denota como 211  $O_n$ , y los ejes se denotan como Norte-Este-Arriba (NEA). Los ejes NEA se denotan también como eje 212  $X_n$ , eje 214  $Y_n$ , y eje 216  $Z_n$ , respectivamente. El plano  $X_n$ - $Y_n$  se denomina plano 202 de referencia local. El plano 202 de referencia local (también denominado plano de nivel local) y el origen 211  $O_n$  se definen, por ejemplo, por un ingeniero de campo. Una práctica común es definir el plano 202 de referencia local de manera que el eje 216  $Z_n$  sea paralelo al vector de fuerza gravitacional local. En algunas prácticas, el plano 202 de referencia local es tangente al elipsoide de la Tierra del Sistema geodésico mundial (WGS-84) o paralelo al plano tangente.

El marco 220 de pala es un sistema de coordenadas cartesianas fijado con respecto a la pala 110. El borde superior de la pala 110 se denota como el borde 110T superior de pala. El borde inferior de la pala 110 se denota como el borde 110B inferior de pala. El origen del marco 220 de pala se denota como 221  $O_b$ , y los ejes se denotan como eje

222  $X_b$ , eje 224  $Y_b$  y eje 226  $Z_b$ . El sentido positivo del eje 222  $X_b$  señala hacia fuera de la superficie frontal de la pala 110. Obsérvese que tanto el marco 210 de navegación como el marco 220 de pala siguen la regla de la mano izquierda.

5 Las razones de rotación angular de pala alrededor del eje 222  $X_b$ , el eje 224  $Y_b$  y el eje 226  $Z_b$  se denotan como 232  $\omega_x$ , 234  $\omega_y$ , y 236  $\omega_z$ , respectivamente. Para simplificar la notación, se omite el subíndice  $b$  en las razones de rotación angular de pala. La posición del origen 221  $O_b$  con respecto a la pala 110 se define por un usuario tal como un ingeniero de control. La orientación del eje 222  $X_b$ , el eje 224  $Y_b$  y eje 226  $Z_b$  con respecto a la pala 110 se define por un usuario. Normalmente, para simplificar las ecuaciones usadas en los algoritmos de control, es ventajoso alinear el eje 224  $Y_b$  en paralelo al borde 110B inferior de pala.

Se hace referencia a la figura 3A. El ángulo de inclinación de pala, denotado como  $\alpha$  302, se define como el ángulo del borde 110B inferior de pala en relación con la superficie 202 de referencia local en el marco 210 de navegación.

15 Se hace referencia a la figura 3B. El ángulo de basculación de pala, denotado como  $\beta$  304, se define como el ángulo que se bascula el borde 110T superior de pala delante de o detrás del borde 110B inferior de pala. El eje 226  $Z_b$  se alinea de manera que interseca con el borde 110B inferior de pala y el borde 110T superior de pala. El ángulo 304 de basculación de pala  $\beta$  es el ángulo del eje 226  $Z_b$  con respecto al eje 216  $Z_n$  en el marco 210 de navegación.

20 En una realización de un sistema de control de pala, el operario de máquina controla manualmente el ángulo 304 de basculación de pala  $\beta$  desplazando el cilindro 120 de control de ángulo de basculación de pala (la figura 1A) hacia delante y hacia atrás, y un sistema de control de inclinación de pala automático automáticamente controla el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$ . Obsérvese que tanto el ángulo 304 de basculación de pala  $\beta$  como el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$  puede variarse de manera intencionada durante una operación de nivelación.

25 Para controlar el ángulo de inclinación de pala bajo movimiento dinámico, es necesaria la estimación precisa y rápida del ángulo de inclinación de pala. Se usan ampliamente sensores de pendiente para estimar el ángulo de inclinación de pala. En general, un sensor de pendiente mide un ángulo de inclinación con respecto a la superficie de referencia local detectando el vector de fuerza gravitacional local. Diversos tipos de sensores de pendiente están disponibles; por ejemplo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), transductores e inclinómetros líquidos.

Aunque los sensores de pendiente pueden proporcionar mediciones de ángulo de inclinación de pala precisas y estables, tienen dos importantes desventajas. En primer lugar, los sensores de pendiente muestran una respuesta lenta a cambios grandes y rápidos del ángulo de inclinación de pala. El tiempo de respuesta lento en la medición de ángulo de inclinación de pala se debe a los filtros internos usados para reducir el ruido; estos filtros limitan el tiempo de respuesta y la velocidad de control. En segundo lugar, los sensores de pendiente funcionan apropiadamente sólo en un intervalo limitado de movimiento dinámico. Tal como se comentó anteriormente, los sensores de pendiente detectan el vector de fuerza gravitacional local para medir el ángulo de inclinación de pala. Sin embargo, un movimiento dinámico alto induce componentes de aceleración adicionales en los sensores de pendiente. Estas componentes de aceleración adicionales perturban la detección del vector de fuerza gravitacional local y dan como resultado errores en la medición de ángulo de inclinación de pala. La vulnerabilidad a movimientos dinámicos altos degrada el rendimiento de los sistemas de control bajo movimientos dinámicos altos de la motoniveladora (u otra máquina de movimiento de tierras). Los movimientos dinámicos altos pueden resultar, por ejemplo, de un giro o frenado repentino.

45 En una realización, las desventajas de los sensores de pendiente se superan combinando sensores de pendiente con un giroscopio de tres ejes, que proporciona mediciones de rotación angular de tres girómetros proporcionales situados ortogonalmente. Un giroscopio de tres ejes puede montarse en diversas configuraciones: como unidad de tres ejes integrada, como combinación de una unidad de eje único y una unidad de dos ejes o como combinación de tres unidades de eje único. Un giroscopio de tres ejes proporciona generalmente mediciones de situación con una alta velocidad de muestreo integrando las salidas de los tres girómetros proporcionales situados ortogonalmente. Ejemplos de girómetros proporcionales incluyen sistemas microelectromecánicos (MEMS) y unidades de fibra óptica. Para máquinas de movimiento de tierras, las unidades MEMS son ventajosas debido a su robustez y bajo coste. Al contrario que para un sensor de pendiente, un giroscopio de tres ejes muestra significativamente menos retardo en la medición de situación, y la medición de situación no se degrada los por movimientos dinámicos que se producen durante el funcionamiento. Sin embargo, un giroscopio de tres ejes tiene una desventaja importante. Cualquier error de sensor se acumula en la computación de la situación, y errores de situación son potencialmente ilimitados.

60 Integrando sensores de pendiente y un giroscopio de tres ejes, las mediciones de sensor de pendiente que tienen precisión y estabilidad a largo plazo compensan los errores de giroscopio. A su vez, un giroscopio de tres ejes proporciona mediciones de situación con pequeños retardos y altas velocidades de muestreo; estas mediciones de situación mantienen alta precisión a corto plazo independientemente del movimiento dinámico.

65 Además de la mejora en las mediciones de situación, una combinación de sensores de pendiente y un giroscopio de tres ejes permite a un sistema de control de inclinación de pala automático usar un algoritmo de control proporcional

y derivado (PD). En una realización, un algoritmo de control PD usa parámetros (comentados en detalle a continuación) calculados a partir del ángulo de inclinación de pala medido por un sensor de pendiente, el ángulo de basculación de pala medido por un segundo sensor de pendiente, y las razones de rotación angular de pala medidas por un giroscopio de tres ejes. La realimentación de razón de rotación angular de pala en el controlador aumenta ventajosamente la velocidad del control de ángulo de inclinación de pala al tiempo que mantiene la precisión y la estabilidad. Tal como se describe a continuación, se usan las mediciones de dos sensores de pendiente debido a que el acoplamiento entre el ángulo de basculación de pala y el ángulo de inclinación de pala al realizar transformaciones entre el marco de navegación y el marco de pala.

En la realización mostrada en la figura 4A, una unidad 402 de sensor está montada sobre la parte trasera de la pala 110. La unidad 402 de sensor incluye dos sensores de pendiente y un giroscopio de tres ejes (no mostrado). El primer sensor de pendiente está montado de manera que mide el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$  en el marco 210 de navegación (figura 3A). El segundo sensor de pendiente está montado de manera que mide el ángulo 304 de basculación de pala  $\beta$  en el marco 210 de navegación (figura 3B). El giroscopio de tres ejes incluye tres girómetros proporcionales situados ortogonalmente. El eje sensible del primer, el segundo y el tercer girómetros proporcionales coincide con el eje 222  $X_b$ , el eje 224  $Y_b$  y el eje 226  $Z_b$ , respectivamente, en el marco 220 de pala (figura 2). Los girómetros proporcionales primero, segundo y tercero miden las razones de rotación angular de pala 232  $\omega_x$ , 234  $\omega_y$  y 236  $\omega_z$ , respectivamente, en el marco 220 de pala.

En la realización mostrada en la figura 4B, la unidad 402 de sensor está montada sobre un poste 404 unido a la pala 110. El poste 404 puede instalarse específicamente para la unidad 402 de sensor. El poste 404 también puede usarse para el montaje de otros equipos de medición. En el ejemplo mostrado en la figura 4B, una antena 406 está montada sobre el poste 404. La antena 406 se usa para recibir señales de sistema satélite de navegación global (GNSS) cuando un GNSS se emplea para medir la posición de la pala 110. En otro ejemplo, un receptor óptico (no mostrado) está montado sobre el poste 404 cuando un sistema láser se emplea para medir la elevación de la pala 110.

En el presente documento, un sensor fijado a la pala 110 se refiere a un sensor cuya posición y situación se fijan en relación con el marco 220 de pala. Un sensor fijado a la pala 110 puede montarse directamente sobre la pala 110 (figura 4A) o montarse sobre un soporte unido de manera rígida a la pala 110 (por ejemplo, el poste 404 en la figura 4B). En la figura 4A y la figura 4B, los sensores de pendiente y el giroscopio de tres ejes se muestran como un único conjunto, la unidad 402 de sensor. En otras realizaciones, los sensores de pendiente y el giroscopio de tres ejes están configurados como conjuntos independientes. Si los sensores de pendiente ya están fijados a la pala para un sistema de medición o control, un giroscopio de tres ejes puede fijarse de manera independiente a la pala. Los costes por tanto pueden reducirse usando los sensores de pendiente existentes.

Se muestran diagramas esquemáticos de un sistema de control de inclinación de pala automático según una realización en la figura 5A y la figura 6A. La figura 5A muestra un esquema de un algoritmo de control proporcional y derivado (PD) para el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$ . La señal 507 de control  $u_\alpha$  se introduce en un sistema 530 hidráulico que controla los cilindros hidráulicos en la motoniveladora 100 (figura 1A y figura 1B). Los sistemas hidráulicos se conocen bien en la técnica, y no se describen detalles en el presente documento. Tal como se comentó anteriormente, el ángulo de elevación de pala y el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$  se controlan mediante el cilindro 112 de levantamiento derecho y el cilindro 114 de levantamiento izquierdo. En general, tanto el cilindro 112 de levantamiento derecho como el cilindro 114 de levantamiento izquierdo puede ajustarse para controlar la elevación de pala, y tanto el cilindro 112 de levantamiento derecho como el cilindro 114 de levantamiento izquierdo pueden ajustarse para controlar el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$ . En una realización, un cilindro (denominado el cilindro de control de elevación de pala) se usa para controlar la elevación de pala y el otro cilindro (denominado el cilindro de control de ángulo de inclinación de pala) se usa para controlar el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$ . En una convención, el cilindro 112 de levantamiento derecho sirve como el cilindro de control de elevación de pala y el cilindro 114 de levantamiento izquierdo sirve como el cilindro de control de ángulo de inclinación de pala; sin embargo, las funciones de los dos cilindros pueden intercambiarse.

En una realización, la señal 507 de control  $u_\alpha$  es una señal eléctrica que controla una válvula eléctricamente controlada en el sistema 530 hidráulico. El sistema 530 hidráulico controla el desplazamiento del cilindro 532 de control de ángulo de inclinación de pala que controla el ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$  de la pala 110. La unidad 402 de sensor fijada a la pala 110 envía una señal 513 de sensor, una señal 515 de sensor y una señal 517 de sensor al módulo 540 estimador de inclinación de pala. A continuación, se describen detalles adicionales. El módulo 540 estimador de inclinación de pala se refiere a un módulo funcional. La implementación del módulo funcional se comenta a continuación.

La señal 513 de sensor, la señal 515 de sensor y la señal 517 de sensor proporcionan mediciones sin procesar que incluyen errores. El módulo 540 estimador de inclinación de pala realiza computaciones que reducen diversos errores. Las salidas del módulo 540 estimador de inclinación de pala son la salida 531, que representa la estimación de razón de rotación angular de pala  $\tilde{\omega}_x$  alrededor del eje 222  $X_b$ , y la salida 533, lo que representa la estimación

de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$ . A continuación, se comentan las estimaciones.

La señal 507 de control  $u_\alpha$  se calcula tal como sigue. La entrada 501  $\alpha_{ref}$  representa el valor de referencia (deseado) del ángulo de inclinación de pala. La entrada 501  $\alpha_{ref}$  puede variarse de manera intencionada durante diferentes fases de una operación de nivelación. En una realización,  $\alpha_{ref}$  501 se introduce manualmente por un operario de máquina o un ingeniero de campo. En otra realización, se genera un modelo matemático del perfil de terreno deseado y los valores de  $\alpha_{ref}$  501 se computan automáticamente basándose en la posición actual de pala en el modelo de terreno.

En la operación 520, la estimación 533 de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$ , computada mediante el módulo 540 estimador de inclinación de pala, se resta del ángulo 501 de inclinación de pala de referencia  $\alpha_{ref}$  para dar lugar al ángulo 503 de inclinación de pala error  $\varepsilon_\alpha$ . En la operación 522, el ángulo 503 de inclinación de pala error  $\varepsilon_\alpha$  se multiplica por la ganancia de control proporcional  $K_p$  para dar lugar al producto 505  $K_p\varepsilon_\alpha$ . En la operación 526, la estimación 531 de razón de rotación angular de pala  $\tilde{\omega}_x$  alrededor del eje 222  $X_b$ , computada mediante el módulo 540 estimador de inclinación de pala, se multiplica por la ganancia de control de velocidad  $K_v$  para dar lugar al producto 535  $K_v\tilde{\omega}_x$ . En la operación 524, el producto 535  $K_v\tilde{\omega}_x$ , se resta del producto  $K_p\varepsilon_\alpha$  505 para dar lugar a la señal 507 de control  $u_\alpha$ . El objetivo del algoritmo de control PD es mantener el ángulo 503 de inclinación de pala error  $\varepsilon_\alpha$  dentro de los límites definidos por el usuario. Estos límites se definen, por ejemplo, por un ingeniero de campo o ingeniero de control.

Se hace referencia a la figura 6A. Se muestran la unidad 402 de sensor y el módulo 540 estimador de inclinación de pala. La unidad 402 de sensor incluye un sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala, un sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala y un giroscopio 606 de tres ejes. Las mediciones emitidas por la unidad 402 de sensor se denominan mediciones sin procesar. El módulo 540 estimador de inclinación de pala incluye un módulo 610 de procesamiento previo de sensor, un módulo 612 de procesamiento de sensor y un módulo 614 de calibración de desviación de girómetro. El módulo 610 de procesamiento previo de sensor, el módulo 612 de procesamiento de sensor y el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro hacen referencia a módulos funcionales. La implementación de los módulos funcionales se describe a continuación.

El sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala mide el ángulo de inclinación de pala en el marco 210 de navegación. La salida del sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala se denota como ángulo de inclinación de pala  $\alpha_{pendiente}$ . Debido a factores tales como errores de medición y retardos de medición, este valor sin procesar en general puede diferir del valor real del ángulo 302 de inclinación de pala  $\alpha$ . Este valor sin procesar se transmite en la señal 513 desde sensor de la unidad 402 de sensor hasta el módulo 540 estimador de inclinación de pala.

El sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala mide el ángulo de basculación de pala en el marco 210 de navegación. La salida del sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala se denota como el ángulo de basculación de pala  $\beta_{pendiente}$ . Debido a factores tales como errores de medición y retardos de medición, este valor sin procesar en general puede diferir del valor real del ángulo 304 de basculación de pala  $\beta$ . Este valor sin procesar se transmite en la señal 515 de sensor desde la unidad 402 de sensor hasta el módulo 540 estimador de inclinación de pala.

El giroscopio 606 de tres ejes mide las razones de rotación angular de pala 232  $\omega_x$ , 234  $\omega_y$  y 236  $\omega_z$  alrededor del eje 222  $X_b$ , el eje 224  $Y_b$  y el eje 226  $Z_b$ , respectivamente, en el marco 220 de pala (figura 2). Las razones de rotación angular de pala sin procesar [denotadas como ( $\omega_{girómetro,x}$ ,  $\omega_{girómetro,y}$ ,  $\omega_{girómetro,z}$ )] se transmiten en la señal 517 de sensor desde la unidad 402 de sensor hasta la módulo 540 estimador de pala.

Los valores ( $\omega_{girómetro,x}$ ,  $\omega_{girómetro,y}$ ,  $\omega_{girómetro,z}$ ) se introducen en el módulo 610 de procesamiento previo de sensor, que computa estimaciones de los parámetros que representan la situación actual de pala. En una realización, se usan ángulos de Euler (ángulo de balanceo  $\phi$ , ángulo de cabeceo  $\theta$ , y ángulo de guiñada  $\Psi$ ) para representar la situación actual de pala. En otra realización, un cuaternión se usa para representar la situación actual de pala.

Los detalles de computación de las estimaciones de los ángulos de Euler se comentan a continuación. La salida 601 del módulo 610 de procesamiento previo de sensor incluye la estimación de ángulo de balanceo computada  $\phi_{girómetro}$  y la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{girómetro}$ ; estos valores se introducen en el módulo 612 de procesamiento de sensor. En condiciones específicas, tal como se comenta a continuación, el módulo 612 de procesamiento de sensor combina la estimación de ángulo de balanceo computada  $\phi_{girómetro}$  y la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{girómetro}$  con el ángulo de inclinación de pala  $\alpha_{pendiente}$  medido por el sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala y el ángulo de basculación de pala  $\beta_{pendiente}$  medido por el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala. El módulo 612 de procesamiento de sensor computa la estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$ , la estimación de razón de rotación angular de pala de eje  $X_b$   $\tilde{\omega}$ , la estimación

ángulo de balanceo corregida  $\tilde{\phi}$ , la estimación ángulo de cabeceo corregida  $\tilde{\theta}$ , la estimación de desviación de girómetro corregida de eje  $X_b$   $\tilde{G} b_x$  y la estimación de desviación de girómetro corregida de eje  $Y_b$   $\tilde{G} b_y$ . A continuación se describen detalles adicionales del módulo 612 de procesamiento de sensor.

5 La combinación de los datos recogidos del sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala, el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala y el giroscopio 606 de tres ejes pueden proporcionar correcciones para las estimaciones computadas del giroscopio 606 de tres ejes solo. Los valores corregidos se denominan estimaciones corregidas debido a que existen errores residuales; es decir, los valores corregidos en general pueden diferir de los valores reales. Las desviaciones de girómetro hacen referencia a errores de compensación en las mediciones del giroscopio 606 de tres ejes; la determinación de las desviaciones de girómetro se comenta en más detalle a continuación.

10 La salida 603 del módulo 612 de procesamiento de sensor representa las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}$ ,  $\tilde{\theta}$ ,  $\tilde{G} b_x$  y  $\tilde{G} b_y$ ; la salida 603 se realimenta al módulo 610 de procesamiento previo de sensor para mejorar la precisión de estimaciones posteriores de  $\phi_{\text{girómetro}}$  y  $\theta_{\text{girómetro}}$ . A continuación se describen detalles adicionales del módulo 610 de procesamiento previo de sensor. La salida 605 del módulo 612 de procesamiento de sensor representa el valor  $\tilde{G} b_x$ ; la salida 605 se introduce en el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro. La salida 533 del módulo 612 de procesamiento de sensor representa la estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$ .

20 El módulo 614 de calibración de desviación de girómetro recibe el valor  $\tilde{G} b_x$  del módulo 612 de procesamiento de sensor y el valor sin procesar  $\omega_{\text{girómetro},x}$  medido por el giroscopio 606 de tres ejes. La salida 531 del módulo 614 de calibración de desviación de girómetro representa la estimación de razón de rotación angular de pala  $\tilde{\omega}_x$ . La estimación de razón de rotación angular de pala  $\tilde{\omega}_x$  se computa restando  $\tilde{G} b_x$  de  $\omega_{\text{girómetro},x}$ .

25 Las salidas del módulo 540 estimador de inclinación de pala son la salida 533, que representa la estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$ , y la salida 531, que representa la estimación de razón de rotación angular de pala  $\tilde{\omega}_x$ . Estos valores se usan en el algoritmo de control derivado y proporcional mostrado en la figura 5A, tal como se describe anteriormente.

30 Detalles de la del ángulo de Euler en el módulo 610 de procesamiento previo de sensor se describen tal como sigue. El marco 220 de pala se genera a partir del marco 210 de navegación (figura 2) a través de rotaciones sucesivas de ángulos, denominados ángulos de Euler y denotados como ángulo de balanceo  $\phi$ , ángulo de cabeceo  $\theta$ , y ángulo de guiñada  $\Psi$ :

35 (1) Comenzar con el marco 210 de navegación inicial con ejes  $(X_n, Y_n, Z_n)$ . Denotar este marco de referencia como  $RF_0$  con ejes  $(X_0 = X_n, Y_0 = Y_n, Z_0 = Z_n)$ .

40 (2) Rotar  $RF_0$  alrededor del eje  $Z_0$  a través del ángulo  $\Psi$ . Denotar el marco de referencia resultante como  $RF_1$  con ejes  $(X_1, Y_1, Z_1 = Z_0)$ .

(3) Rotar  $RF_1$  alrededor del eje  $Y_1$  a través del ángulo  $\theta$ . Denotar el marco de referencia resultante como  $RF_2$  con ejes  $(X_2, Y_2 = Y_1, Z_2)$ .

45 (4) Rotar  $RF_2$  alrededor del eje  $X_2$  a través del ángulo  $\phi$ . Denotar el marco de referencia resultante como  $RF_3$ , con  $(X_3 = X_2, Y_3, Z_3)$

Obsérvese que: En las etapas (2) a (4), el origen de los marcos de referencia permanece fijado en 211  $O_n$  (figura 2). El marco 220 de pala se genera a partir de  $RF_3$ , trasladando el origen desde 211  $O_n$  hasta 222  $O_b$ . Sin embargo, dado que los algoritmos de control PD usan sólo los ángulos de Euler, puede dejarse de lado el traslado.

50 Usando estos ángulos de Euler, el ángulo de inclinación de pala  $\alpha$  y el ángulo de basculación de pala  $\beta$  se computan tal como sigue:

$$\alpha = \text{atan} \left( \frac{\text{sen}(\phi) \cos(\theta)}{\sqrt{\cos^2(\phi) + \text{sen}^2(\phi) \text{sen}^2(\theta)}} \right) \quad (\text{E1})$$

$$\beta = \theta. \quad (E2)$$

5 Durante una operación de nivelación, en general, el ángulo de inclinación de pala real varía del ángulo de inclinación de pala de referencia. Los valores del ángulo de inclinación de pala y el ángulo de basculación de pala medidos por los sensores de pendiente y los valores de las razones de rotación angular de pala medidos por el giroscopio de tres ejes en general son funciones de tiempo. Se muestrean mediciones de los sensores de pendiente y el giroscopio de tres ejes en tiempos específicos. El número de muestras por unidad de tiempo se denomina la velocidad de muestreo; y el intervalo de tiempo entre muestras sucesivas se denomina el intervalo de muestreo. Normalmente, la velocidad de muestreo del giroscopio de tres ejes es mayor que la velocidad de muestreo de los sensores de pendiente.

10 En el módulo 610 de procesamiento previo de sensor, los ángulos de Euler se actualizan cada vez que se obtienen nuevas mediciones (muestras) del giroscopio 606 de tres ejes. Los ángulos de Euler se computan basándose en el giroscopio de tres ejes mediciones tal como sigue. En primer lugar, se estiman los valores iniciales de los ángulos de Euler y desviaciones en los girómetros proporcionales en el giroscopio 606 de tres ejes. Para esta estimación, el sistema de control requiere un determinado periodo de tiempo de inicialización durante el cual la pala permanece sin movimiento. Teóricamente, debido a que la pala permanece sin movimiento, el giroscopio 606 de tres ejes debe emitir razones de rotación angular de pala nulas durante este periodo (ignorando el efecto de la rotación de la Tierra). Sin embargo, debido al ruido y la desviación aleatorios, las mediciones tienen generalmente ruido y están desviadas. La estimación de desviación inicial en cada girómetro proporcional ( $\tilde{G}_{b_{x,0}}$  para el girómetro de eje  $X_b$ ,  $\tilde{G}_{b_{y,0}}$  para el girómetro de eje  $Y_b$  y  $\tilde{G}_{b_{z,0}}$  para el girómetro de eje  $Z_b$ ) se estima promediando la razón de rotación angular de pala mediciones sobre este periodo de inicialización.

15 Las desviaciones pueden variar como una función de tiempo. La variación es sustancial en los giroscopios de MEMS en particular. Para mejorar la precisión de la estimación de ángulo de inclinación de pala, por tanto, las desviaciones actuales se estiman mediante el módulo 612 de procesamiento de sensor, tal como se describe a continuación.

20 La estimación inicial del ángulo de guiñada ( $\Psi_{girómetro,0}$ ) puede establecerse en un valor arbitrario tal como cero debido a que el ángulo de inclinación de pala y el ángulo de basculación de pala son independientes del ángulo de guiñada, tal como se muestra en (E1) y (E2). La estimación inicial del ángulo de cabeceo ( $\theta_{girómetro,0}$ ) se estima promediando las mediciones del sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala sobre el periodo de inicialización. El valor inicial del ángulo de balanceo ( $\phi_{girómetro,0}$ ) se estima entonces según la siguiente ecuación:

$$\phi_{girómetro,0} = \text{atan} \left( \frac{\tan(\bar{\alpha})}{\sqrt{\cos^2(\theta_{girómetro,0}) - \tan^2(\bar{\alpha}) \sin^2(\theta_{girómetro,0})}} \right), \quad (E3)$$

35 Donde  $\bar{\alpha}$  es el promedio de las mediciones del sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala sobre el periodo de inicialización.

40 Una vez que los valores iniciales de los ángulos de Euler y las desviaciones de girómetro se han establecido, las estimaciones de ángulo de Euler se actualizan mediante un método que usa una matriz de rotación. La matriz de rotación  $C_t$  en el tiempo  $t$  se proporciona tal como sigue con las estimaciones de ángulo de Euler ( $\phi_{gt}, \theta_{gt}, \Psi_{gt}$ ) en el tiempo  $t$ :

$$C_t = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{gt})\cos(\psi_{gt}) & -\cos(\phi_{gt})\sin(\psi_{gt}) + \sin(\phi_{gt})\sin(\theta_{gt})\cos(\psi_{gt}) & \sin(\phi_{gt})\sin(\psi_{gt}) + \cos(\phi_{gt})\sin(\theta_{gt})\cos(\psi_{gt}) \\ \cos(\theta_{gt})\sin(\psi_{gt}) & \cos(\phi_{gt})\cos(\psi_{gt}) + \sin(\phi_{gt})\sin(\theta_{gt})\sin(\psi_{gt}) & -\sin(\phi_{gt})\cos(\psi_{gt}) + \cos(\phi_{gt})\sin(\theta_{gt})\sin(\psi_{gt}) \\ -\sin(\theta_{gt}) & \sin(\phi_{gt})\cos(\theta_{gt}) & \cos(\phi_{gt})\cos(\theta_{gt}) \end{bmatrix} \quad (E4)$$

45 Se usa la siguiente notación compacta:  $\rho_{gt} = \rho_{girómetro}(t)$ , donde  $\rho_{gt}$  es una estimación de una función arbitraria  $\rho$  computada a partir de los valores de ( $\omega_{girómetro,x}(t)$ ,  $\omega_{girómetro,y}(t)$ ,  $\omega_{girómetro,z}(t)$ ) emitidos por el giroscopio 606 de tres ejes en el tiempo  $t$ . En la notación compacta, ( $\omega_{girómetro,x}(t)$ ,  $\omega_{girómetro,y}(t)$ ,  $\omega_{girómetro,z}(t)$ ) se denotan como ( $\omega_{gxt}$ ,  $\omega_{gyt}$ ,  $\omega_{gzt}$ ). Las mediciones ( $\omega_{gxt}$ ,  $\omega_{gyt}$ ,  $\omega_{gzt}$ ) se actualizan mediante el giroscopio 606 de tres ejes en instantes de tiempo discretos  $\tau = (\dots, t-2, t-1, t, t+1, t+2, \dots)$ , donde  $\tau$  es el tiempo de sistema (por ejemplo, haciendo referencia a un reloj de

sistema). Estos instantes de tiempo discretos se denominan también los momentos de muestreo del giroscopio 606 de tres ejes. El intervalo de tiempo entre los instantes de tiempo es el intervalo de muestreo  $\Delta t$ . Cada vez que se obtienen nuevas mediciones  $(\omega_{gxt}, \omega_{gyt}, \omega_{gzt})$  del giroscopio 606 de tres ejes, la matriz de rotación se actualiza.

5 La actualización de la matriz de rotación desde  $t$  hasta  $t+1$  se calcula tal como sigue:

$$\mathbf{C}_{t+1} = \mathbf{C}_t \mathbf{A}_t \quad (\text{E5})$$

$$\mathbf{A}_t = \mathbf{I} + \left(1 - \frac{\sigma^2}{3!}\right) [\boldsymbol{\sigma} \times] + \left(\frac{1}{2} - \frac{\sigma^2}{4!}\right) [\boldsymbol{\sigma} \times]^2, \quad (\text{E6})$$

10 donde  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad  $3 \times 3$ .  $\sigma^2$  y  $[\boldsymbol{\sigma} \times]$  se proporcionan tal como sigue:

(E7)

$$\sigma^2 = \{(\omega_{gxt} - \tilde{G}b_{xt})^2 + (\omega_{gyt} - \tilde{G}b_{yt})^2 + (\omega_{gzt} - \tilde{G}b_{zt})^2\} (\Delta t)^2$$

(E8)

$$[\boldsymbol{\sigma} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_{gzt} - \tilde{G}b_{zt}) & (\omega_{gyt} - \tilde{G}b_{yt}) \\ (\omega_{gzt} - \tilde{G}b_{zt}) & 0 & -(\omega_{gxt} - \tilde{G}b_{xt}) \\ -(\omega_{gyt} - \tilde{G}b_{yt}) & (\omega_{gxt} - \tilde{G}b_{xt}) & 0 \end{bmatrix} \Delta t$$

15

Entonces, se computan nuevos ángulos de Euler a partir de la nueva matriz de rotación tal como sigue:

$$\phi_{\text{girómetro}} = \text{atan} \left( \frac{c_{32}}{c_{33}} \right) \quad (\text{E9})$$

$$\theta_{\text{girómetro}} = \text{asen} (-c_{31})$$

$$\psi_{\text{girómetro}} = \text{atan} \left( \frac{c_{21}}{c_{11}} \right),$$

20

donde  $C_{ij}$  representa el elemento  $(i,j)$  en la matriz de rotación.

Tras actualizar los ángulos de Euler, el módulo 610 de procesamiento previo de sensor emite las estimaciones de ángulo de balanceo computadas  $\phi_{\text{girómetro}}$  y la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{\text{girómetro}}$ . A partir de estos

25 dos valores, tal como se muestra a continuación, la estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$  puede

computarse. En principio, la precisión de la estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$  puede mejorarse usando la estimación de ángulo de balanceo computada  $\phi_{\text{girómetro}}$  y la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{\text{girómetro}}$  con el ángulo de inclinación de pala  $\alpha_{\text{pendiente}}$  medido por el sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala y el ángulo de basculación de pala  $\beta_{\text{pendiente}}$  medido por el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala (tal como se muestra a continuación). En la práctica, sin embargo, la combinación de los datos no es sencilla debido a que los sensores no están sincronizados y debido a que los sensores de pendiente no son precisos durante movimiento dinámico fuerte. Estos factores se comentan a continuación.

En general, la velocidad de muestreo de un giroscopio de tres ejes es más alta que la velocidad de muestreo de un sensor de pendiente. Además, en general, el giroscopio 606 de tres ejes, el sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala y el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala no están sincronizados. Si los datos del giroscopio 606 de tres ejes se combinan con datos obsoletos del sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala o del sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala, se dan como resultado estimaciones que pueden tener grandes errores.

Tal como se comentó anteriormente, los sensores de pendiente son vulnerables a movimientos dinámicos altos, mientras que los giroscopios de tres ejes son relativamente inmunes a movimientos dinámicos altos. Si los datos del giroscopio 606 de tres ejes se combinan con datos imprecisos del sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala o el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala, las estimaciones resultantes pueden tener grandes errores.

Puede realizarse combinación de sensores (combinación de datos de múltiples sensores) mediante diversos filtros. Tal como se comentó anteriormente, la estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}$  se computa a partir de la estimación de ángulo de balanceo computada  $\phi_{\text{girómetro}}$  y la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{\text{girómetro}}$ . Por tanto, la precisión de la estimación de ángulo de inclinación de pala depende de la precisión de  $\phi_{\text{girómetro}}$  y  $\theta_{\text{girómetro}}$ . La precisión de  $\phi_{\text{girómetro}}$  y la precisión de  $\theta_{\text{girómetro}}$  dependen de la precisión de las estimaciones de desviación de girómetro. Además, la precisión de la estimación de razón de rotación angular de pala  $\tilde{\omega}_x$  depende de la precisión de la estimación de desviación de girómetro  $\tilde{G}b_x$ . Para obtener una estimación de ángulo de inclinación de pala precisa y una estimación de razón de rotación angular de pala precisa, por tanto, la combinación de sensores debe proporcionar correcciones precisas en la estimación de ángulo de balanceo computada  $\phi_{\text{girómetro}}$ , la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{\text{girómetro}}$ , la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$ , y la estimación de desviación de girómetro de eje  $Y_b$ .

Hay dos observaciones disponibles para el filtro de combinación de sensores: el ángulo  $\alpha_{\text{pendiente}}$  de inclinación de pala y el ángulo  $\beta_{\text{pendiente}}$  de basculación de pala medido por el sensor de pendiente de ángulo de inclinación de pala y el sensor de pendiente de ángulo de basculación de pala, respectivamente. Por otra parte, hay cuatro parámetros que deben estimarse mediante el filtro: las correcciones en la estimación de ángulo de balanceo computada, la estimación de ángulo de cabeceo computada, la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$ , y la estimación de desviación de girómetro de eje  $Y_b$ . Por tanto, el filtro debe funcionar en modelos de sistema dinámicos simples o múltiples que relaciona los errores en el ángulo de balanceo, el ángulo de cabeceo, la desviación de girómetro de eje  $X_b$ , y la desviación de girómetro de eje  $Y_b$  con el ángulo de inclinación de pala y la pala ángulo de basculación. Filtros de Kalman o filtros de partículas son ejemplos de filtros adecuados que se diseñan basándose en un modelo de sistema dinámico.

De la figura 7A a la 7C muestran un diagrama de flujo de un algoritmo, según una realización, realizada por el modulo 612 de procesamiento de sensor. Las marcas de referencia mostradas como caracteres alfabéticos dentro de un hexágono se usan para mantener la continuidad entre de la figura 7A a la figura 7C. Las marcas de referencia son marca A 701 de referencia, marca B 703 de referencia, marca C 705 de referencia, y marca D 707 de referencia. Las marcas de referencia se muestran en las figuras como ayudas visuales pero no están incluidas explícitamente en la descripción a continuación.

Se hace referencia a la figura 7A. En la etapa 702, la estimación de ángulo de balanceo computada  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  se introduce desde el módulo 610 de procesamiento previo de sensor. El procedimiento avanza entonces a la etapa 704, en la que se determina la disponibilidad de un nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  del sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala. El valor de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  llega al módulo 612 de procesamiento de sensor at  $\tau_t = t + \delta_{spp}$  donde  $\delta_{spp}$  es el retardo de procesamiento para el módulo 610 de procesamiento previo de sensor. El valor previo de  $\phi_{\text{girómetro}}(t-1)$  llega al modulo 612 de procesamiento de sensor at  $\tau_{t-1} = (t-1) + \delta_{spp}$ . Si un valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  llega en un tiempo  $\tau_\alpha$ , tal como  $\tau_{t-1} < \tau_\alpha \leq \tau_t$ , entonces está disponible un nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ . Para simplificar la notación, el nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  se denomina  $\alpha_{\text{pendiente}}(t)$  cuando la dependencia de tiempo se llama explícitamente. Se mantiene una notación similar para un nuevo valor de  $\beta_{\text{pendiente}}$ , tal como se comenta a continuación.

En etapa 704, si un nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  no está disponible, entonces el procedimiento avanza a la etapa 714 en

la que el valor de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  se emite a la etapa 740 en la figura 7C. Si un nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  está disponible, entonces el procedimiento avanza a la etapa 706 en la que se determina la aparición de una perturbación. Tal como se comentó anteriormente, la medición de un sensor de pendiente puede corromperse mediante perturbaciones tales como movimientos bruscos de la pala (que incluyen movimientos bruscos de toda la motoniveladora).

5 Pueden usarse diversos criterios para determinar cuando se produce una perturbación lo suficientemente alta como para dar una medición inválida de un sensor de pendiente. En una realización, se detecta una perturbación si

$$\left| \alpha_{\text{pendiente}}(\tau_{\alpha}^n) - \alpha_{\text{pendiente}}(\tau_{\alpha}^p) \right| > \Delta \alpha_{\text{pendiente, max}}, \text{ donde } \alpha_{\text{pendiente}}(\tau_{\alpha}^n) \text{ es el nuevo valor de } \alpha_{\text{pendiente}},$$

10  $\alpha_{\text{pendiente}}(\tau_{\alpha}^p)$  es el valor previo de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ , y  $\Delta \alpha_{\text{pendiente, max}}$  es un valor umbral definido por el usuario. Bajo funcionamiento normal, se espera que variaciones en  $\alpha_{\text{pendiente}}$  estén dentro de un intervalo particular. Si el cambio en  $\alpha_{\text{pendiente}}$  de una medición a la siguiente es inesperadamente largo, entonces se sospecha la nueva medición de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ .

15 En otra realización, se detecta una perturbación si  $|\omega_{\text{girómetro,z}}(t)| > \Omega_{\text{girómetro,z}}$ , donde  $\Omega_{\text{girómetro,z}}$  es un valor umbral definido por el usuario. Un valor de  $|\omega_{\text{girómetro,z}}(t)|$  excesivamente alto puede resultar, por ejemplo, si la pala gira bruscamente o se voltea. En la figura 6A, la introducción de  $\omega_{\text{girómetro,z}}$  en el módulo 612 de procesamiento de sensor no se muestra explícitamente. El valor de  $\omega_{\text{girómetro,z}}$  puede introducirse del giroscopio 606 de tres ejes o pasarse a través del módulo 610 de procesamiento previo de sensor.

20 Obsérvese que pueden usarse combinaciones lógicas de diferentes criterios para determinar una perturbación. A

modo de ejemplo, se detecta una perturbación si  $\left| \alpha_{\text{pendiente}}(\tau_{\alpha}^n) - \alpha_{\text{pendiente}}(\tau_{\alpha}^p) \right| > \Delta \alpha_{\text{pendiente, max}}$ , o  $|\omega_{\text{girómetro,z}}(t)| > \Omega_{\text{girómetro,z}}$ .

25 En etapa 706, si se detecta una perturbación, entonces se descarta el nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ , y el procedimiento avanza a la etapa 714, en la que el valor de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  se emite a la etapa 740 en la figura 7C. Si no se detecta una perturbación, entonces se acepta el nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ , y el procedimiento avanza a la etapa 708, en la que se computa  $Z_{\text{balanceo}}(t)$ , la medición de filtro de Kalman en un tiempo  $t$ . Los detalles de etapa 708 se describen a continuación. El procedimiento avanza entonces a la etapa 710, en la que se realiza una determinación de perturbación adicional. Si  $|Z_{\text{balanceo}}(t)| > \zeta_{\text{balanceo}}$ , donde  $\zeta_{\text{balanceo}}$  es un valor umbral definido por el usuario, entonces se detecta una perturbación. En la realización mostrada en la figura 7A, la detección de perturbación en la etapa 710 se realiza además de la detección de perturbación en etapa 706. En una segunda realización, se omite la etapa 706, y sólo se realizan la etapa 708 y la etapa 710 para la detección de perturbación. En una tercera realización, se omiten la etapa 708 y etapa 710, y sólo se realiza la etapa 706 para la detección de perturbación.

35 En etapa 710, si se detecta una perturbación, entonces el nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  se declara como inválido, y el procedimiento avanza a la etapa 714, en la que el valor de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  se emite a la etapa 740 en la figura 7C. Si no se detecta una perturbación, entonces el nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  se declara como válido, y el procedimiento avanza a la etapa 712. Las estimaciones corregidas,  $\tilde{\phi}(t)$  y  $\tilde{G}b_x(t)$ , se computan y emiten a la etapa 740 en la figura 7C.

40 Los detalles de la etapa 712 se comentan a continuación.

Se hace referencia a la figura 7B. El diagrama de flujo en la figura 7B es similar al diagrama de flujo en la figura 7A, excepto que la estimación de ángulo de cabeceo se procesa en vez de la estimación de ángulo de balanceo. En etapa 722, la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{\text{girómetro}}(t)$  se introduce desde el módulo 610 de procesamiento previo de sensor. El procedimiento avanza entonces a la etapa 724, en la que se determina la disponibilidad de un nuevo valor de  $\beta_{\text{pendiente}}$  desde el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala. Los criterios para la disponibilidad de un nuevo valor de  $\beta_{\text{pendiente}}$  son similares a los criterios mencionados anteriormente para la disponibilidad de un nuevo valor de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ . Si un nuevo valor de  $\beta_{\text{pendiente}}$  no está disponible, entonces el procedimiento avanza a la etapa 734, en la que el valor de  $\theta_{\text{girómetro}}(t)$  se emite a la etapa 740 en la figura 7C.

50 Si un nuevo valor de  $\beta_{\text{pendiente}}$  está disponible, entonces el procedimiento avanza a la etapa 726, en la que se determina la aparición de una perturbación. Los criterios para detectar una perturbación en mediciones de  $\beta_{\text{pendiente}}$  son similares a los criterios mencionados anteriormente para detectar una perturbación en mediciones de  $\alpha_{\text{pendiente}}$ .

55 En etapa 726, si se detecta una perturbación, entonces se descarta el nuevo valor de  $\beta_{\text{pendiente}}$ , y el procedimiento avanza a la etapa 734, en la que el valor de  $\theta_{\text{girómetro}}(t)$  se emite a la etapa 740 en la figura 7C. Si no se detecta una

5 perturbación, entonces se acepta el nuevo valor de  $\beta_{pendiente}$ , y el procedimiento avanza a la etapa 728, en la que se computa  $z_{cabeceo}(t)$ , la medición de filtro de Kalman en un tiempo  $t$ . Los detalles de etapa 728 se describen a continuación. El procedimiento avanza entonces a la etapa 730, en la que se realiza una detección de perturbación adicional. Si  $|z_{cabeceo}(t)| > \zeta_{cabeceo}$ , donde  $\zeta_{cabeceo}$  es un valor umbral definido por el usuario, entonces se detecta una perturbación. En la realización mostrada en la figura 7B, se realiza la detección de perturbación en etapa 730 además de la detección de perturbación en etapa 726. En una segunda realización, se omite la etapa 726, y sólo se realizan la etapa 728 y la etapa 730 para la detección de perturbación. En una tercera realización, se omiten la etapa 728 y etapa 730, y sólo se realiza la etapa 726 para la detección de perturbación.

10 En etapa 730, si se detecta una perturbación, entonces el nuevo valor de  $\beta_{pendiente}$  se declara como inválido, y el procedimiento avanza a la etapa 734, en la que el valor de  $\theta_{girómetro}(t)$  se emite a la etapa 740 en la figura 7C. Si no se detecta una perturbación, entonces el nuevo valor de  $\beta_{pendiente}$  se declara como válido, y el procedimiento avanza a la etapa 732. Las estimaciones corregidas,  $\tilde{\theta}(t)$  y  $\tilde{G}b_y(t)$ , se computan y emiten a la etapa 740 en la figura 7C. Los detalles de etapa 732 se comentan a continuación.

15 Se hace referencia a la figura 7C. En etapa 740, se selecciona un algoritmo de estimación de inclinación de pala (BSEA). La elección de BSEA depende de si un valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  está disponible (figura 7A) y de si un valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  está disponible (figura 7B). Hay cuatro selecciones posibles:

20 Etapa 750: computa BSEA 1 (valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  no disponible, valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  no disponible)

Etapa 760: computa BSEA 2 (valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  disponible, valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  no disponible)

25 Etapa 770: computa BSEA 3 (valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  no disponible, valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  disponible)

Etapa 780: computa BSEA 4 (valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  disponible, valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  disponible).

30 A continuación, los BSEA individuales se suman en primer lugar. Más adelante, se comentan, detalles de los algoritmos para computar las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}(t)$ ,  $\tilde{\theta}(t)$ ,  $\tilde{G}b_x(t)$ , y  $\tilde{G}b_y(t)$ .

En BSEA 1, un valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  no está disponible, y un valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  no está disponible. No se realiza ninguna combinación de sensores. La estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}(t)$

35 se computa a partir del  $\phi_{girómetro}(t)$  y  $\theta_{girómetro}(t)$ :

(E10)

$$\tilde{\alpha}(t) = \text{atan} \left( \frac{\text{sen}(\phi_{\text{girómetro}}(t)) \cos(\theta_{\text{girómetro}}(t))}{\sqrt{\cos^2(\phi_{\text{girómetro}}(t)) + \text{sen}^2(\phi_{\text{girómetro}}(t)) \text{sen}^2(\theta_{\text{girómetro}}(t))}} \right).$$

40 Ningún valor corregido de los parámetros se realimentan al módulo 610 de procesamiento previo de sensor. Ningún valor corregido de la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$  se introduce en el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro. Puesto que ningún valor corregido de la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$  se introduce en el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro, el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro computa la estimación de razón de rotación angular de pala de eje  $X_b$   $\tilde{\omega}_x(t)$  de  $\omega_{\text{girómetro},x}(t)$  y el valor previo de la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$ , denominada  $Gb_x(t-1)$ :

45

$$\tilde{\omega}(t) = \omega_{\text{girómetro},x}(t) - \tilde{G}b_x(t-1). \quad (\text{E11})$$

Obsérvese que  $\tilde{G}b_x(t-1) = Gb_{x,0}$  si la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$  no se ha corregido previamente.

50 En BSEA 2, un valor nuevo válido de  $\alpha_{pendiente}$  está disponible, y un valor nuevo válido de  $\beta_{pendiente}$  no está disponible.

Se realiza combinación de sensores de  $\phi_{\text{girómetro}}$ ,  $\theta_{\text{girómetro}}$ , y  $\alpha_{\text{pendiente}}$ . Se computa una estimación corregida del ángulo de balanceo, denominada  $\tilde{\phi}(t)$  (los detalles se comentan a continuación). Una estimación corregida de la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$ , denominada  $\tilde{G}b_x(t)$ , se computa (los detalles se comentan a continuación). Las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}(t)$  y  $\tilde{G}b_x(t)$  se realimentan al módulo 610 de procesamiento previo de sensor. La estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}(t)$  se computa a partir de  $\tilde{\phi}(t)$  y  $\theta_{\text{girómetro}}(t)$ :

$$\tilde{\alpha}(t) = \text{atan} \left( \frac{\text{sen}(\tilde{\phi}(t)) \cos(\theta_{\text{girómetro}}(t))}{\sqrt{\cos^2(\tilde{\phi}(t)) + \text{sen}^2(\tilde{\phi}(t)) \text{sen}^2(\theta_{\text{girómetro}}(t))}} \right). \quad (\text{E12})$$

La estimación corregida  $\tilde{G}b_x(t)$  se introduce al módulo 614 de calibración de desviación de girómetro. La estimación de razón de rotación angular de pala de eje  $X_b$   $\tilde{\omega}_x(t)$  se computa a partir de  $\omega_{\text{girómetro},x}(t)$  y  $\tilde{G}b_x(t)$ :

$$\tilde{\omega}(t) = \omega_{\text{girómetro},x}(t) - \tilde{G}b_x(t). \quad (\text{E13})$$

En BSEA 3, un valor nuevo válido de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  no está disponible, y un valor nuevo válido de  $\beta_{\text{pendiente}}$  está disponible. Se realiza combinación de sensores de ( $\phi_{\text{girómetro}}$ ,  $\theta_{\text{girómetro}}$ , y  $\beta_{\text{pendiente}}$ ). Una estimación corregida del ángulo de cabeceo, denominado  $\tilde{\theta}(t)$ , se computa (los detalles se comentan a continuación). Una estimación corregida de la estimación de desviación de girómetro de eje  $Y_b$ , denominada  $\tilde{G}b_y(t)$  se computa (los detalles se comentan a continuación). Las estimaciones corregidas  $\tilde{\theta}(t)$  y  $\tilde{G}b_y(t)$  se realimentan al módulo 610 de procesamiento previo de sensor. La estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}(t)$  se computa a partir de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  y  $\tilde{\theta}(t)$ :

$$\tilde{\alpha}(t) = \text{atan} \left( \frac{\text{sen}(\phi_{\text{girómetro}}(t)) \cos(\tilde{\theta}(t))}{\sqrt{\cos^2(\phi_{\text{girómetro}}(t)) + \text{sen}^2(\phi_{\text{girómetro}}(t)) \text{sen}^2(\tilde{\theta}(t))}} \right). \quad (\text{E14})$$

Ningún valor corregido de la estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$  se introduce en el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro. La estimación de razón de rotación angular de pala de eje  $X_b$   $\tilde{\omega}_x(t)$  se computa a partir de  $\omega_{\text{girómetro},x}(t)$  y  $\tilde{G}b_x(t-1)$ :

$$\tilde{\omega}(t) = \omega_{\text{girómetro},x}(t) - \tilde{G}b_x(t-1). \quad (\text{E15})$$

En BSEA 4, un valor nuevo válido de  $\alpha_{\text{pendiente}}$  está disponible, y un valor nuevo válido de  $\beta_{\text{pendiente}}$  está disponible. Se realiza combinación de sensores de  $\phi_{\text{girómetro}}$ ,  $\theta_{\text{girómetro}}$ ,  $\alpha_{\text{pendiente}}$ , y  $\beta_{\text{pendiente}}$ . Las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}(t)$ ,  $\tilde{\theta}(t)$ ,  $\tilde{G}b_x(t)$ , y  $\tilde{G}b_y(t)$  se computan. Las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}(t)$ ,  $\tilde{\theta}(t)$ ,  $\tilde{G}b_x(t)$ , y  $\tilde{G}b_y(t)$  se realimentan al módulo 610 de procesamiento previo de sensor. La estimación de ángulo de inclinación de pala  $\tilde{\alpha}(t)$  se computa a partir de  $\phi(t)$  y  $\theta(t)$ :

$$\tilde{\alpha}(t) = \text{atan} \left( \frac{\text{sen}(\tilde{\phi}(t)) \cos(\tilde{\theta}(t))}{\sqrt{\cos^2(\tilde{\phi}(t)) + \text{sen}^2(\tilde{\phi}(t)) \text{sen}^2(\tilde{\theta}(t))}} \right). \quad (\text{E16})$$

La estimación corregida  $\tilde{G}b_x(t)$  se introduce en el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro. La estimación de razón de rotación angular de pala de eje  $X_b$   $\tilde{\omega}_x(t)$  se computa a partir de  $\omega_{\text{girómetro},x}(t)$  y  $\tilde{G}b_x(t)$ :

5

$$\tilde{\omega}(t) = \omega_{\text{girómetro},x}(t) - \tilde{G}b_x(t). \quad (\text{E17})$$

10

Tal como se comentó anteriormente, computación de los valores actuales de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$  y  $\theta_{\text{girómetro}}(t)$  en el módulo 610 de procesamiento previo de sensor usa el valor previo del ángulo de balanceo, el valor previo del ángulo de cabeceo, el valor de la estimación de desviación de ángulo de balanceo, y el valor de la estimación de desviación de ángulo de cabeceo. La precisión de computar los siguientes valores de  $\phi_{\text{girómetro}}(t+1)$  y  $\theta_{\text{girómetro}}(t+1)$  puede mejorarse usando las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}(t)$ ,  $\tilde{\theta}(t)$ ,  $\tilde{G}b_x(t)$ , y  $\tilde{G}b_y(t)$  en vez de de  $\phi_{\text{girómetro}}(t)$ ,  $\theta_{\text{girómetro}}(t)$ ,  $\tilde{G}b_x(t-1)$ , y  $\tilde{G}b_y(t-1)$ . Por tanto, el modulo 612 de procesamiento de sensor realimenta valores de las estimaciones corregidas  $\tilde{\phi}(t)$ ,  $\tilde{\theta}(t)$ ,  $\tilde{G}b_x(t)$ , y  $\tilde{G}b_y(t)$ , cuando están disponibles, al módulo 610 de procesamiento previo de sensor.

15

20

En una realización, el modulo 612 de procesamiento de sensor usa dos filtros de Kalman extendidos (EKF) para combinar datos de sensores. El primer EKF computa la estimación corregida de ángulo de balanceo y la estimación corregida de desviación de ángulo de balanceo (estimación de desviación de girómetro de eje  $X_b$  corregida). El segundo EKF computa la estimación corregida de un ángulo de cabeceo y la estimación corregida de desviación de ángulo de cabeceo (estimación de desviación de girómetro de eje  $Y_b$  corregida).

25

Los detalles del EKF para el ángulo de balanceo y las estimaciones de desviación de ángulo de balanceos son los siguientes. El vector de estado  $x_{\text{balanceo}}$  del EKF incluye el error de ángulo de balanceo  $\Delta\phi$  y el error de desviación de girómetro de eje  $X_b$   $\Delta Gb_x$ :

$$x_{\text{balanceo}} = \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta Gb_x \end{bmatrix}. \quad (\text{E18})$$

30

Para este vector de estado, puede darse un modelo de propagación de estado como sigue:

$$x_{\text{balanceo}}(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{\text{balanceo}}(t) + w_{\text{balanceo}}(t), \quad (\text{E19})$$

35

donde  $w_{\text{balanceo}}(t)$  es un vector de ruido de sistema 2x1 en un tiempo  $t$  en el que el primer elemento representa el ruido en el ángulo de balanceo, y el segundo elemento representa el ruido en la razón de rotación angular de balanceo.

Con el vector de estado  $x_{\text{balanceo}}(t)$  y las mediciones de sensor de pendiente  $\alpha_{\text{pendiente}}(t)$ , se forma un modelo de observación como sigue:

$$z_{\text{balanceo}}(t) = [1 \quad 0] x_{\text{balanceo}}(t) + R_{\text{balanceo}}(t), \quad (\text{E20})$$

donde  $R_{\text{balanceo}}(t)$  es el ruido de medición en el sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala.  $z_{\text{balanceo}}(t)$ , la medición de filtro de Kalman en un tiempo  $t$ , se computa con la siguiente ecuación usando la estimación  $\phi_{\text{girómetro}}$  de ángulo de balanceo computada y la estimación  $\theta_{\text{girómetro}}$  de ángulo de cabeceo computada, computada en el módulo 610 de procesamiento previo de sensor y el ángulo de inclinación de pala  $\alpha_{\text{pendiente}}$  medido mediante el sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala:

$$z_{\text{balanceo}}(t) = \text{atan} \left( \frac{\text{sen}(\phi_{\text{girómetro}}(t)) \cos(\theta_{\text{girómetro}}(t))}{\sqrt{\cos^2(\phi_{\text{girómetro}}(t)) + \text{sen}^2(\phi_{\text{girómetro}}(t)) \text{sen}^2(\theta_{\text{girómetro}}(t))}} \right) - \alpha_{\text{pendiente}}(t). \quad (\text{E21})$$

Representando estos modelos en una forma general de filtro de Kalman, puede realizarse un EKF que estima el error de ángulo de balanceo  $\Delta\phi$  y el error de desviación de girómetro de eje  $X_b$   $\Delta Gb_x$  usando mediciones de sensor de pendiente.

Con el vector de estado estimado en el EKF, el ángulo de balanceo y la desviación de girómetro de eje  $X_b$  se corrigen como sigue:

$$\tilde{\phi}(t) = \phi_{\text{girómetro}}(t) - \Delta\phi(t) \quad (\text{E22})$$

$$\tilde{G}b_x(t) = \tilde{G}b_x(t-1) + \Delta Gb_x(t). \quad (\text{E23})$$

Del mismo modo, pueden derivarse los modelos para el EKF para el ángulo de cabeceo. El vector de estado ( $x_{\text{cabeceo}}$ ) para este EKF incluye el error de ángulo de cabeceo  $\Delta\theta$  y el error de desviación de girómetro de eje  $Y_b$   $\Delta Gb_y$ . El modelo de propagación de estado se da entonces como sigue:

$$x_{\text{cabeceo}}(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{\text{cabeceo}}(t) + w_{\text{cabeceo}}(t), \quad (\text{E24})$$

donde  $w_{\text{cabeceo}}(t)$  es un vector de ruido de sistema 2x1 en un tiempo  $t$  en el que el primer elemento representa el ruido en el ángulo de cabeceo, y el segundo elemento representa el ruido en la razón de rotación angular de cabeceo. Con el sensor de pendiente de ángulo de basculación de pala medición ( $\beta_{\text{pendiente}}$ ), se forma el modelo de observación como sigue:

$$z_{\text{cabeceo}}(t) = [1 \quad 0] x_{\text{cabeceo}}(t) + R_{\text{cabeceo}}(t), \quad (\text{E25})$$

donde  $R_{\text{cabeceo}}(t)$  es el ruido de medición en el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala.  $z_{\text{cabeceo}}(t)$ , la medición de filtro de Kalman en un tiempo  $t$ , se computa con la siguiente ecuación usando la estimación de ángulo de cabeceo computada  $\theta_{\text{girómetro}}$  computada en el módulo 610 de procesamiento previo de sensor y la pala ángulo de basculación  $\beta_{\text{pendiente}}$  medida por el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala:

$$z_{\text{cabeceo}}(t) = \theta_{\text{girómetro}}(t) - \beta_{\text{pendiente}}(t). \quad (\text{E26})$$

representando estos modelos en una forma general de filtro de Kalman, puede realizarse un EKF que estima el error de ángulo de cabeceo  $\Delta\theta$  y el error de desviación de girómetro de eje  $Y_b \Delta Gb_y$  usando mediciones de sensor de pendiente.

5 Con el vector de estado estimado en el EKF, se corrigen el ángulo de cabeceo y la desviación de girómetro de eje  $Y_b$  como sigue:

$$\tilde{\theta}(t) = \theta_{\text{girómetro}}(t) - \Delta\theta(t) \quad (\text{E27})$$

$$\tilde{G}b_y(t) = \tilde{G}b_y(t-1) + \Delta Gb_y(t). \quad (\text{E28})$$

15 En la realización descrita anteriormente, la orientación de pala se representa mediante ángulos de Euler. En otra realización, la orientación de pala se representa mediante un cuaternión. Al contrario que con ángulos de Euler, el cuaternión es una representación de situación de cuatro parámetros con los que el sistema de coordenadas del marco 210 de navegación puede transformarse en el sistema de coordenadas del marco 220 de pala (figura 2). El cuaternión en el instante de tiempo actual puede propagarse al cuaternión en el siguiente instante de tiempo mediante el uso de mediciones  $(\omega_{\text{girómetro},x}, \omega_{\text{girómetro},y}, \omega_{\text{girómetro},z})$  del giroscopio 606 de tres ejes (véase la figura 6A). La representación de situación mediante un cuaternión y el método de propagación que usa mediciones de girómetro se conocen bien en la técnica. Un experto en la técnica puede diseñar realizaciones de un módulo de procesamiento previo de sensor y un módulo de procesamiento de sensor para un cuaternión similar a aquellos descritos anteriormente para ángulos de Euler.

25 En las realizaciones descritas anteriormente, el sistema de coordenadas del marco 210 de navegación se transforma en el sistema de coordenadas del marco 220 de pala a través de ángulos de Euler o un cuaternión. En otras realizaciones, el sistema de coordenadas del marco 220 de pala se transforma en el sistema de coordenadas del marco 210 de navegación a través de ángulos de Euler o un cuaternión.

30 La figura 5A y la figura 6A muestran un esquema de un algoritmo de control proporcional y derivado. Para algunas aplicaciones, puede usarse un algoritmo de control proporcional. Por ejemplo, si las especificaciones para la superficie graduada acabada no son tan estrictas, puede usarse un sistema de control de inclinación de pala automático una complejidad menor y coste más bajo. La figura 5B y la figura 6B muestran un esquema de un algoritmo de control proporcional. Tal como se muestra en la figura 5B, para un algoritmo de control proporcional, se omite el bucle derivado en la figura 5A (operación 526 y operación 524). La señal de control  $u_\alpha$  es entonces igual al producto  $K_p \varepsilon_\alpha$  505. En la figura 6B, se omite el módulo 614 de calibración de desviación de girómetro, puesto que la estimación 531 de razón de rotación angular de pala *de eje*  $X_b \tilde{\omega}_x$  no se necesita para el algoritmo de control proporcional.

40 Puesto que el sistema de control de inclinación de pala automático descrito en el presente documento es independiente de la elevación de pala, el sistema de control de inclinación de pala automático puede añadirse a las motoniveladoras existentes sin sustituir o modificar los sistemas de control de elevación existentes. Aunque la motoniveladora 100 (figura 1A y figura 1B) se usó como ejemplo específico de una máquina de movimiento de tierras, las realizaciones del sistema de control de inclinación de pala automático descritas en el presente documento pueden usarse por otra máquina de movimiento de tierras, tales como buldócers. En general, un experto en la técnica puede desarrollar realizaciones del sistema de control de inclinación de pala automático descrito en el presente documento para el control de inclinación automática de una implementación montada en un vehículo, en el que puede especificarse la situación de la implementación con respecto a un plano de referencia local mediante un ángulo de inclinación de implementación y un ángulo de basculación de implementación. Por ejemplo, las realizaciones del sistema de control de inclinación de pala automático descritas en el presente documento pueden usarse para el control de inclinación automática de una maestra en un pavimentador. En general, en el presente documento, el término "pala" se refiere a una pala o una implementación similar a la pala tal como una maestra.

55 En la figura 5A, la señal 507 de control  $u_\alpha$  se introduce en el sistema 530 hidráulico, que controla el desplazamiento del cilindro 532 de control de ángulo de inclinación de pala. Tal como se comentó anteriormente, el sistema 530 hidráulico también puede controlar el ángulo de inclinación de pala controlando el desplazamiento de dos cilindros de control hidráulicos (el cilindro 112 de levantamiento derecho y el cilindro 114 de levantamiento izquierdo mostrados en la figura 1A y la figura 1B). Un experto en la técnica puede desarrollar realizaciones del sistema de control de inclinación de pala automático para otros sistemas de accionamiento. Por ejemplo, la señal 507 de control  $u_\alpha$  puede introducirse en un sistema de control electrónico que acciona un motor eléctrico que a su vez acciona un engranaje, tornillo, pistón, o árbol de accionamiento a través de un acoplamiento apropiado. En general, la señal 507

de control  $\alpha$  se introduce en un sistema de accionamiento de ángulo de inclinación de pala, que controla un accionador de control de ángulo de inclinación de pala acoplado de manera operativa a la pala 110. Un accionador también se denomina actuador.

5 Una realización de un sistema 800 computacional para implementar un sistema de control de ángulo de inclinación de pala automático se muestra en la figura 8. El sistema 800 computacional, por ejemplo, puede instalarse en la cabina 104 de la motoniveladora 100 (figura 1 A y figura 1 B). Un experto en la técnica puede construir el sistema 800 computacional a partir de diversas combinaciones de hardware, firmware, y software. Un experto en la técnica puede construir el sistema 800 computacional a partir de diversos componentes electrónicos, incluyendo uno o más  
10 micropocersadores con fines generales, uno o más procesadores de señal digital, uno o más circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), y uno o más matrices de compuerta programable por campo (FPGA).

El sistema 800 computacional incluye un ordenador 802, que incluye una unidad 804 de procesamiento central (CPU), memoria 806, y un dispositivo 808 de almacenamiento de datos. El dispositivo 808 de almacenamiento de datos incluye al menos un medio legible por ordenador persistente, no transitorio y tangible, tal como memoria de semiconductor no volátil, un disco duro magnético, o una memoria de sólo lectura de disco compacto.  
15

El sistema 800 computacional puede incluir además una interfaz 810 de entrada/salida de usuario, que interconecta el ordenador 802 a los dispositivos 830 de entrada/salida de usuario. Ejemplos de dispositivos 830 de entrada/salida de usuario incluyen un teclado, un ratón, un terminal de acceso local, y un elemento de visualización de vídeo. Los datos, incluyendo un código ejecutable por ordenador, pueden transferirse a y desde el ordenador 802 a través de la interfaz 810 de entrada/salida de usuario.  
20

El sistema 800 computacional puede incluir además una interfaz 822 de red de comunicaciones, que interconecta el ordenador 802 con una red de comunicaciones. Ejemplos de la red de comunicaciones incluyen una red de área local y una red de área ancha. Un usuario puede acceder al ordenador 802 a través de un terminal de acceso remoto (no mostrado) que comunica con la red de comunicaciones. Los datos, incluyendo el código ejecutable por ordenador, pueden transferirse a y desde el ordenador 802 a través de la interfaz 822 de red de comunicaciones.  
25

El sistema 800 computacional puede incluir además una interfaz 812 de sensor de pendiente de ángulo de inclinación de pala, que interconecta el ordenador 802 con el sensor 602 de pendiente de ángulo de inclinación de pala.  
30

El sistema 800 computacional puede incluir además un sensor de pendiente de ángulo de basculación de pala interface 814, que interconecta el ordenador 802 con el sensor 604 de pendiente de ángulo de basculación de pala.  
35

El sistema 800 computacional puede incluir además una interfaz 816 de giroscopio de tres ejes, que interconecta el ordenador 802 con el giroscopio 606 de tres ejes.

El sistema 800 computacional puede incluir además una interfaz 818 de sistema hidráulico, que interconecta el ordenador 802 con el sistema 530 hidráulico.  
40

El sistema 800 computacional puede incluir además una interfaz 820 de sensores auxiliares, que interconecta el ordenador 802 con sensores 830 auxiliares. Ejemplos de sensores 830 auxiliares incluyen un receptor de sistema de satélite de navegación global y un receptor óptico.  
45

Cada una de las interfaces descritas anteriormente puede hacer funcionar diferentes medios físicos. Ejemplos de medios físicos incluyen cables, fibras ópticas, óptica por el espacio libre, y ondas electromagnéticas (normalmente en el intervalo de radiofrecuencia y comúnmente denominado como interfaz inalámbrica).  
50

Como bien se conoce, un ordenador funciona bajo el control de un software informático, que define el funcionamiento global del ordenador y aplicaciones. La CPU 804 controla el funcionamiento global del ordenador y aplicaciones ejecutando instrucciones de programa informático que definen el funcionamiento global y aplicaciones. Las instrucciones de programa informático pueden almacenarse en el dispositivo 808 de almacenamiento de datos y cargarse en la memoria 806 cuando se desea una ejecución de las instrucciones de programa. Los algoritmos de control de ángulo de inclinación de pala automático se muestran esquemáticamente en la figura 5A, la figura 5B, la figura 6A, y la figura 6B puede definirse mediante las instrucciones de programa informático almacenadas en la memoria 806 o en el dispositivo 808 de almacenamiento de datos (o en una combinación de la memoria 806 y el dispositivo 808 de almacenamiento de datos) y controlarse mediante la CPU 804 que ejecuta las instrucciones de programa informático. Por ejemplo, las instrucciones de programa informático pueden implementarse como código ejecutable por ordenador programado por un experto en la técnica para realizar algoritmos. Por consiguiente, ejecutando las instrucciones de programa informático, la CPU 804 ejecuta los algoritmos de control de ángulo de inclinación de pala automático mostrados esquemáticamente en la figura 5A, la figura 5B, la figura 6A, y la figura 6B.  
55  
60

La descripción detallada anterior debe entenderse como que cada punto es ilustrativo y a modo de ejemplo, pero no restrictivo, y el alcance de la invención dada a conocer en el presente documento no debe determinarse a partir de la  
65

5 descripción detallada, sino a partir de las reivindicaciones como interpretadas según la amplitud total permitida por las leyes de patente. Debe entenderse que las realizaciones mostradas y descritas en el presente documento sólo son ilustrativas de los principios de la presente invención y que pueden implementarse diversas modificaciones por los expertos en la técnica si apartarse del alcance de la invención como confieren las reivindicaciones adjuntas. Los expertos en la técnica pueden implementar otras combinaciones de característica sin apartarse del alcance de la invención como confieren las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para controlar una pala montada en un vehículo, comprendiendo el método las etapas de:

5 recibir en un primer tiempo una primera estimación de ángulo de balanceo computada y una primera estimación de ángulo de cabeceo computada, en el que la primera estimación de ángulo de balanceo computada y la primera estimación de ángulo de cabeceo computada están basadas, al menos en parte, en una primera medición de velocidad angular alrededor de un primer eje, una segunda medición de velocidad angular alrededor de un segundo eje, y una tercera medición de velocidad angular alrededor de un tercer eje de un giroscopio de tres ejes montado en la pala, en el que el primer eje, el segundo eje, y el tercer eje son ortogonales;

15 recibir en un segundo tiempo una segunda estimación de ángulo de balanceo computada y una segunda estimación de ángulo de cabeceo computada, en el que la segunda estimación de ángulo de balanceo computada y la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada están basadas, al menos en parte, en una cuarta medición de velocidad angular alrededor del primer eje, una quinta medición de velocidad angular alrededor del segundo eje, y una sexta medición de velocidad angular alrededor del tercer eje del giroscopio de tres ejes montado en la pala; estando caracterizado el método por

20 recibir en un tercer tiempo una medición de ángulo de inclinación de pala de un sensor de pendiente de ángulo de inclinación de pala montado en la pala;

25 recibir en un cuarto tiempo una medición de ángulo de basculación de pala de un sensor de pendiente de ángulo de basculación de pala montado en la pala;

determinar si se satisface una primera condición de tiempo, en el que la primera condición de tiempo se representa mediante:

30 el tercer tiempo es mayor que el primer tiempo y menor que o igual al segundo tiempo;

después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo:

determinar si la medición de ángulo de inclinación de pala recibida es válida;

35 determinar si se satisface una segunda condición de tiempo, en el que la segunda condición de tiempo se representa mediante:

40 el cuarto tiempo es mayor que el primer tiempo y menor que o igual al segundo tiempo;

después de determinar que se satisface la segunda condición de tiempo:

determinar si la medición de ángulo de basculación de pala recibida es válida; y

45 después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida es válida, la segunda condición de tiempo se satisface y la medición de ángulo de basculación de pala recibida es válida:

50 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida, la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida y la medición de ángulo de basculación de pala recibida.

2. Método según la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

55 después de determinar que no se satisface la primera condición de tiempo y no se satisface la segunda condición de tiempo:

60 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida y la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida;

después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida no es válida y no se satisface segunda condición de tiempo:

65 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida y la segunda estimación de ángulo de cabeceo

computada recibida;

después de determinar que no se satisface la primera condición de tiempo, se satisface la segunda condición de tiempo, y el ángulo de basculación de pala recibido no es válido:

5 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida y la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida; y

10 después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida no es válida, se satisface la segunda condición de tiempo, y el ángulo de basculación de pala recibido no es válido:

15 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida y la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida.

3. Método según la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

20 después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida es válida, y no se satisface la segunda condición de tiempo:

25 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida, la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida y la medición de ángulo de inclinación de pala recibida; y

después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida es válida, se satisface la segunda condición de tiempo, y la medición de ángulo de basculación de pala recibida no es válida:

30 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basada, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida, la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida y la medición de ángulo de inclinación de pala recibida.

35 4. Método según la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

después de determinar que no se satisface la primera condición de tiempo, se satisface la segunda condición de tiempo, y el ángulo de basculación de pala recibido es válido:

40 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida, la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida y la medición de ángulo de basculación de pala recibida; y

45 después de determinar que se satisface la primera condición de tiempo, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida no es válida, se satisface la segunda condición de tiempo y la medición de ángulo de basculación de pala recibida es válida:

50 computar una estimación del ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en la segunda estimación de ángulo de balanceo computada recibida, la segunda estimación de ángulo de cabeceo computada recibida y la medición de ángulo de basculación de pala recibida.

5. Método según la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

55 recibir un ángulo de inclinación de pala de referencia; y

controlar el ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en el ángulo de inclinación de pala de referencia recibido y la estimación del ángulo de inclinación de pala computada.

6. Método según la reivindicación 1, que comprende además las etapas de:

60 recibir un ángulo de inclinación de pala de referencia;

65 computar una estimación de la cuarta velocidad angular basándose, al menos en parte, en la cuarta medición de velocidad angular, la quinta medición de velocidad angular, la sexta medición de velocidad angular, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida y la medición de ángulo de basculación de pala recibida; y

controlar el ángulo de inclinación de pala basándose, al menos en parte, en el ángulo de inclinación de pala de referencia recibido, la estimación del ángulo de inclinación de pala computada y la estimación computada de la cuarta velocidad angular.

5 7. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de computar una estimación del ángulo de inclinación de pala comprende las etapas de:

determinar una primera estimación de una desviación de la cuarta medición de velocidad angular;

10 determinar una primera estimación de una desviación de la quinta medición de velocidad angular;

15 computar una primera estimación de un ángulo de balanceo basándose, al menos en parte, en la cuarta medición de velocidad angular, la quinta medición de velocidad angular, la sexta medición de velocidad angular, la primera estimación determinada de la desviación de la cuarta medición de velocidad angular y la primera estimación determinada de la desviación de la quinta medición de velocidad angular; y

20 computar una primera estimación de un ángulo de cabeceo basándose en la primera medición de velocidad angular, la segunda medición de velocidad angular, y la tercera medición de velocidad angular, la primera estimación determinada de la desviación de la primera medición de velocidad angular y la primera estimación determinada de la desviación de la segunda medición de velocidad angular.

8. Método según la reivindicación 7, que comprende además la etapa de:

25 computar una estimación corregida del ángulo de balanceo, una estimación corregida del ángulo de cabeceo, una estimación corregida de la desviación de la cuarta medición de velocidad angular, y una estimación corregida de la desviación de la quinta medición de velocidad angular basándose en la cuarta medición de velocidad angular, la quinta medición de velocidad angular, la tercera medición de velocidad angular, la medición de ángulo de inclinación de pala recibida, la medición de ángulo de basculación de pala recibida, la primera estimación determinada de la desviación de la cuarta medición de velocidad angular y la primera estimación determinada de la desviación de la quinta medición de velocidad angular.

9. Método según la reivindicación 1, en el que el vehículo comprende una máquina de movimiento de tierras.

35 10. Método según la reivindicación 9, en el que la máquina de movimiento de tierras comprende una motoniveladora.

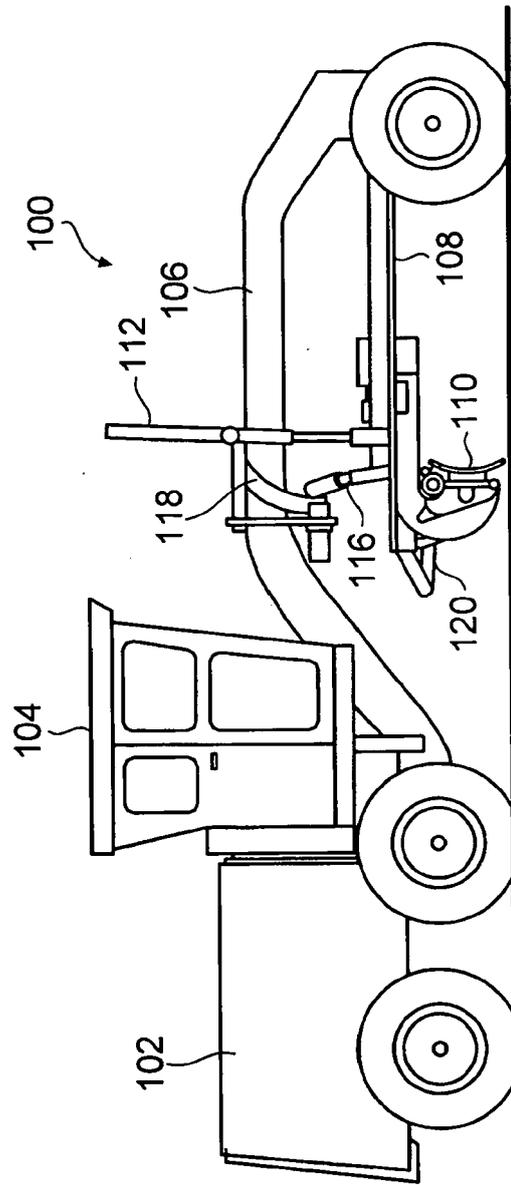
11. Método según la reivindicación 9, en el que la máquina de movimiento de tierras comprende un buldócer.

40 12. Método según la reivindicación 1, en el que la pala comprende una maestra y el vehículo comprende un pavimentador.

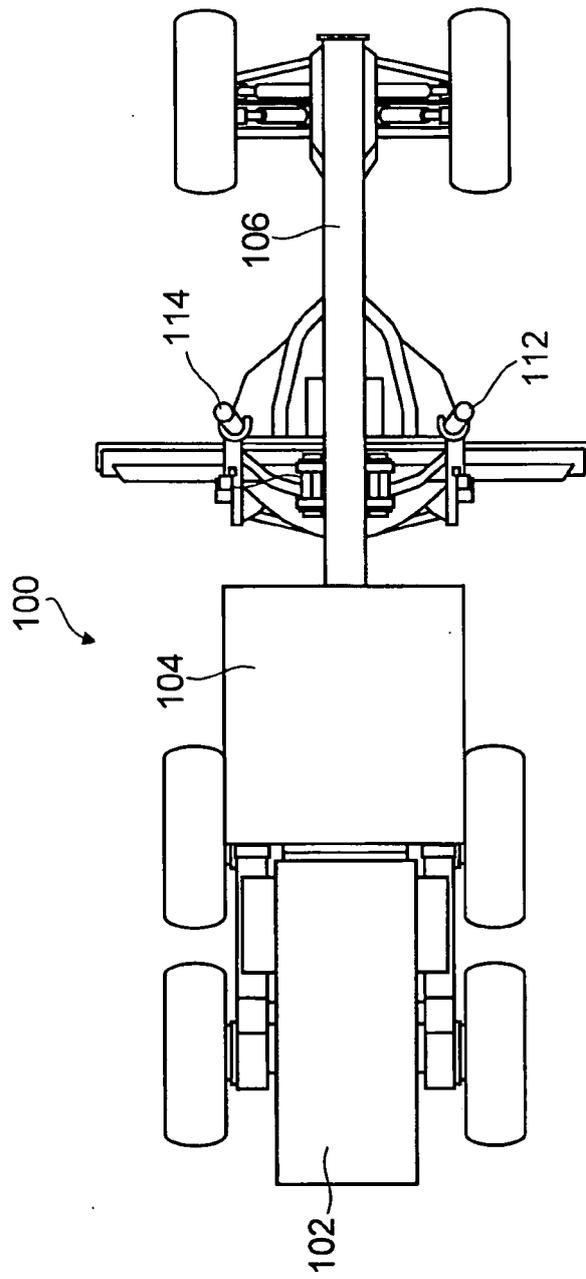
13. Aparato que comprende medios para realizar el método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

45 14. Programa informático para enseñar a un ordenador a realizar el método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

15. Medio legible por ordenador que almacena el programa informático según la reivindicación 14.



*FIG. 1A*



**FIG. 1B**

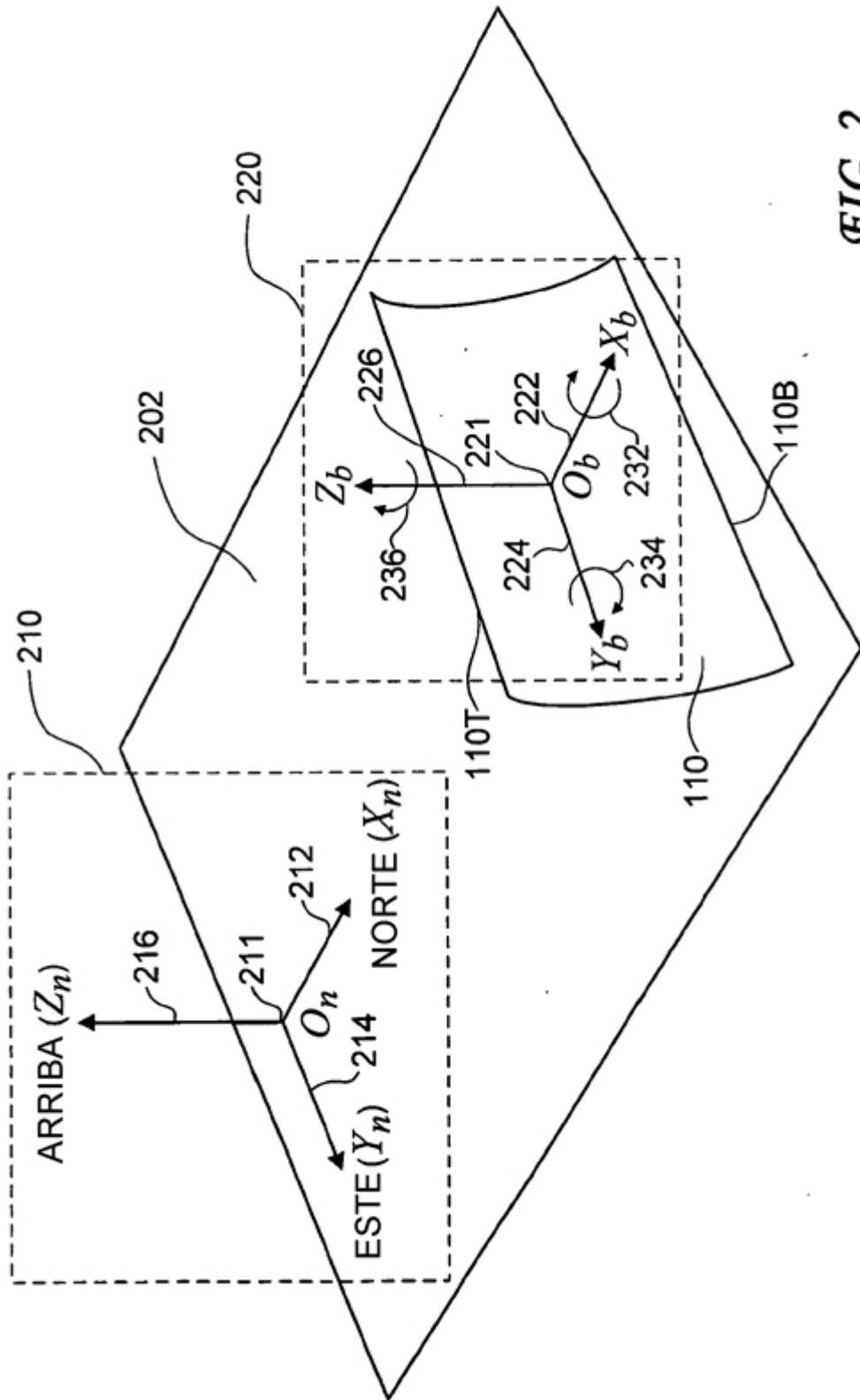
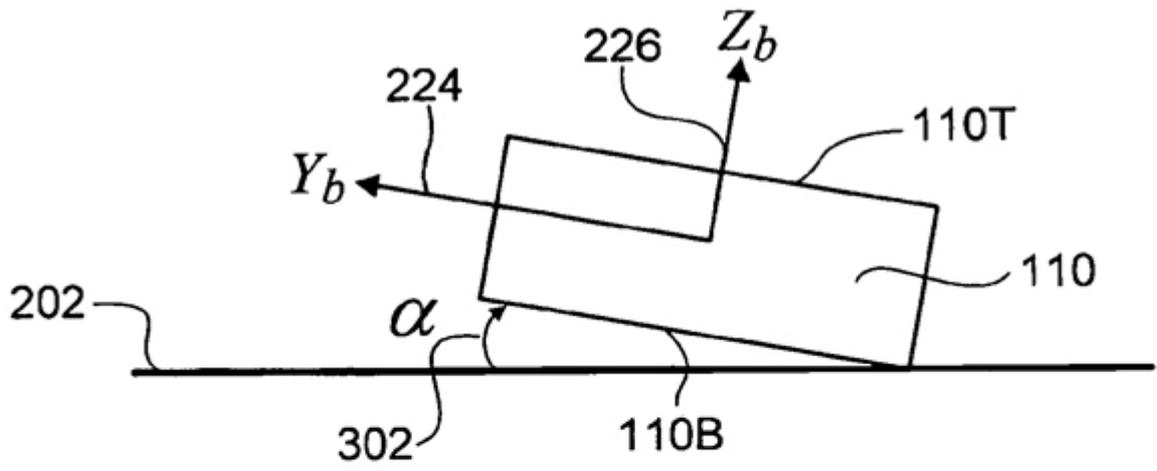
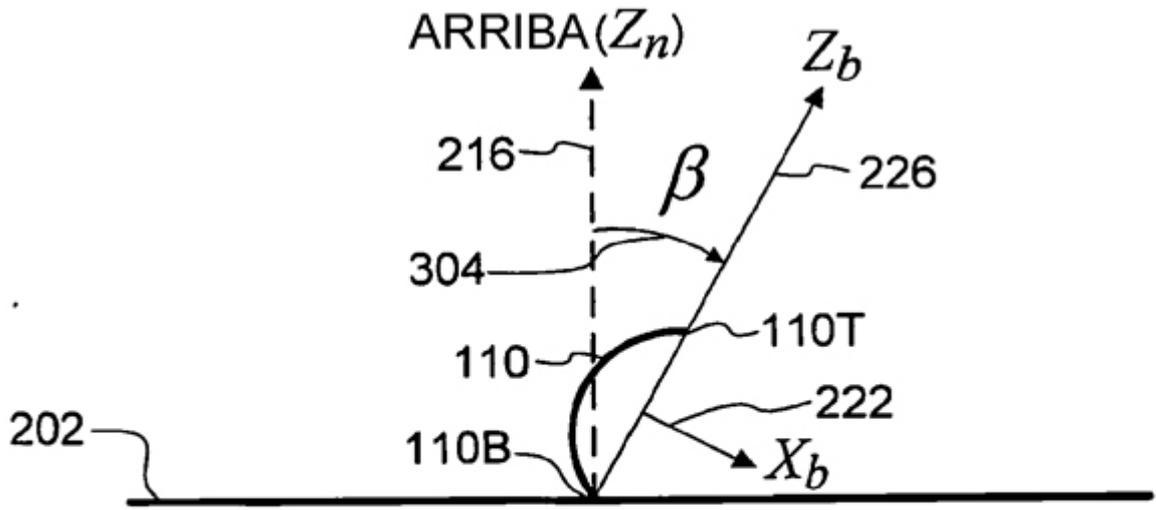


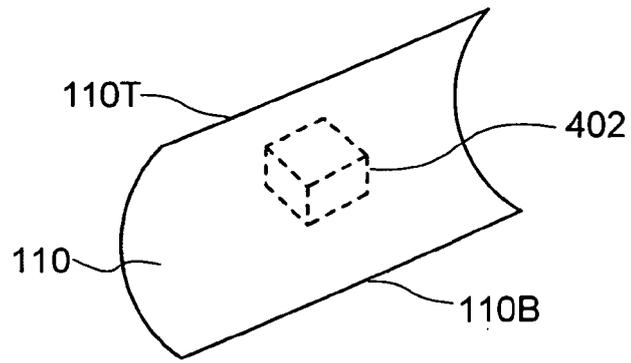
FIG. 2



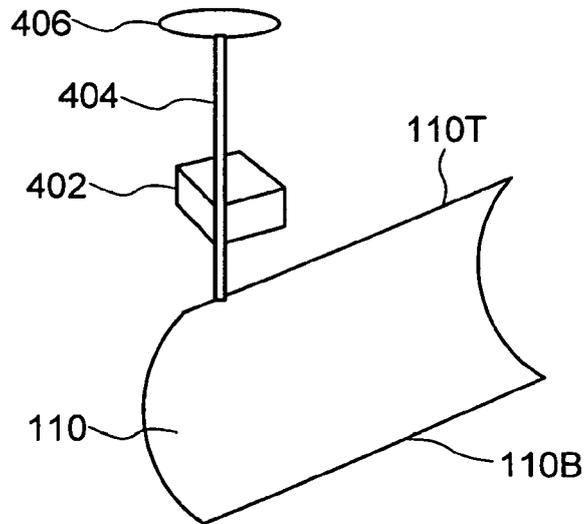
**FIG. 3A**



**FIG. 3B**



**FIG. 4A**



**FIG. 4B**

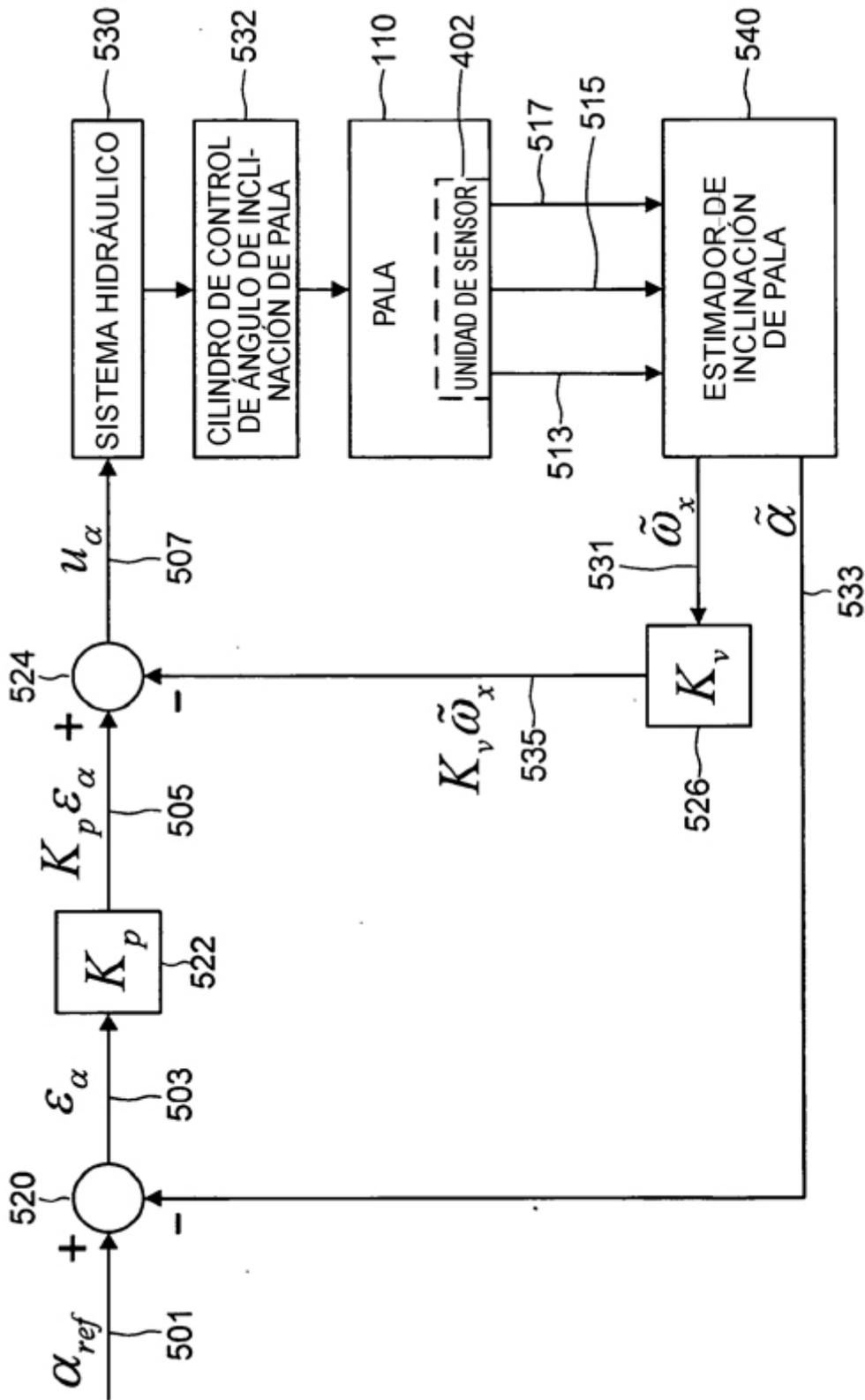


FIG. 5A

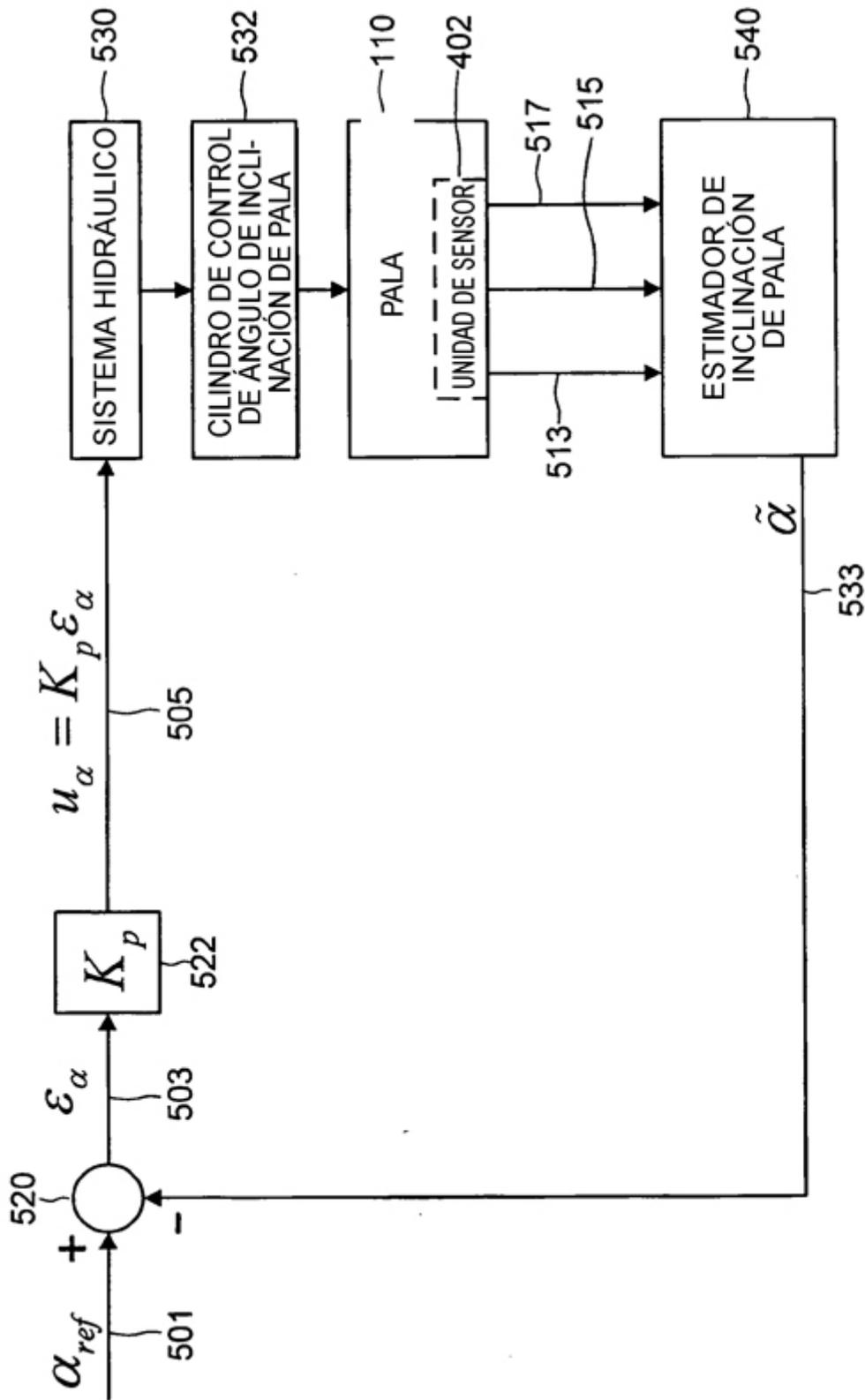


FIG. 5B

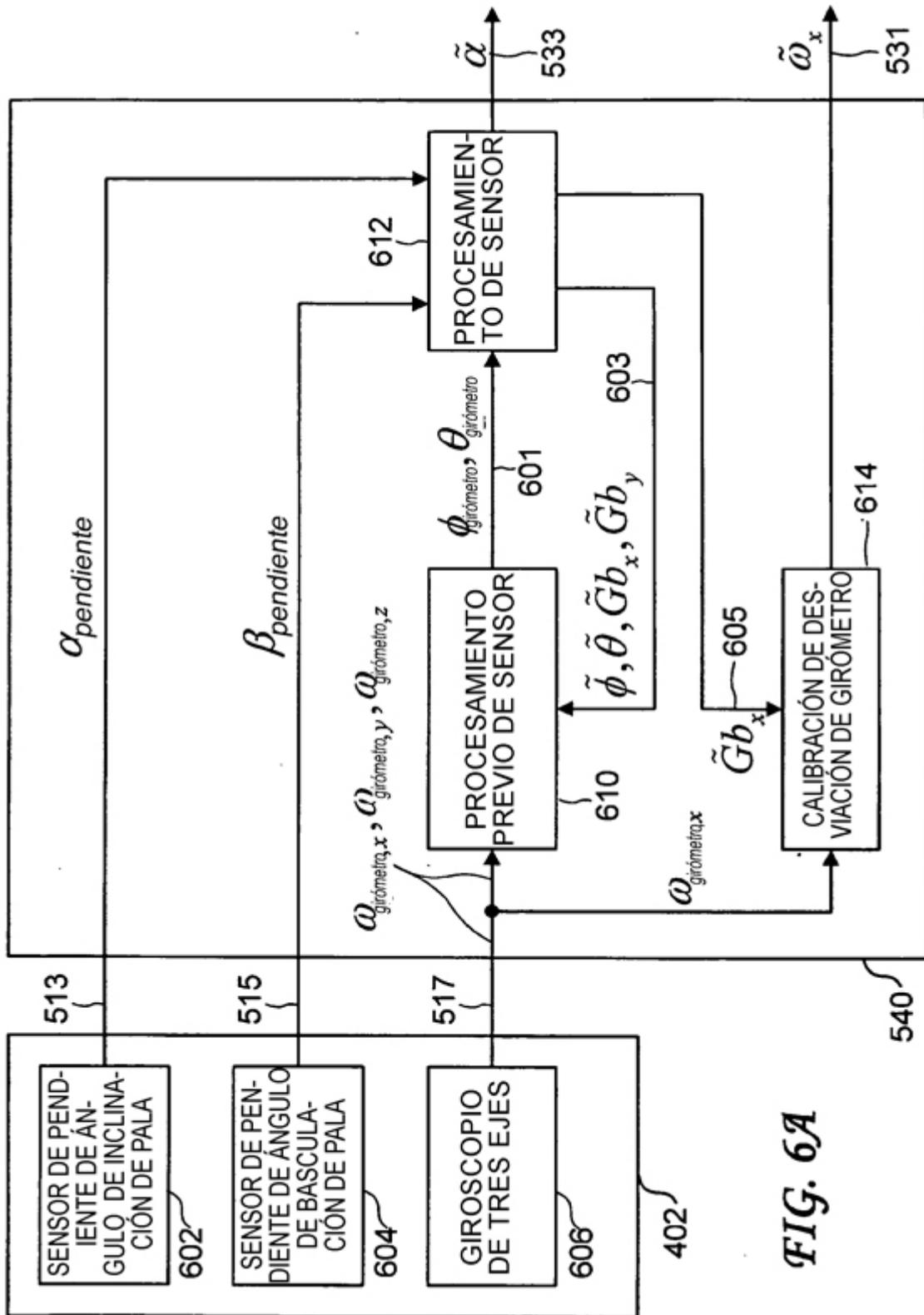


FIG. 6A

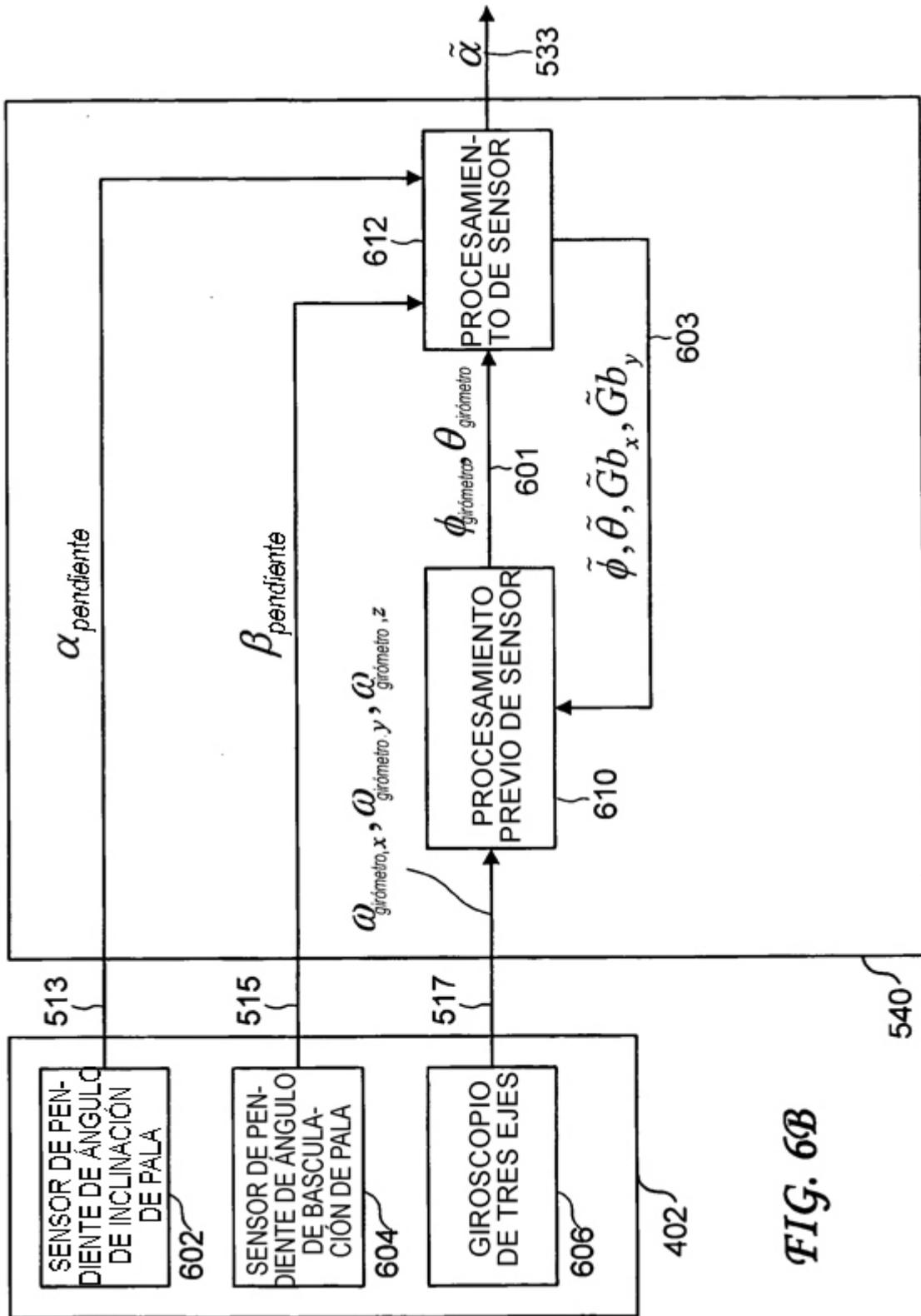
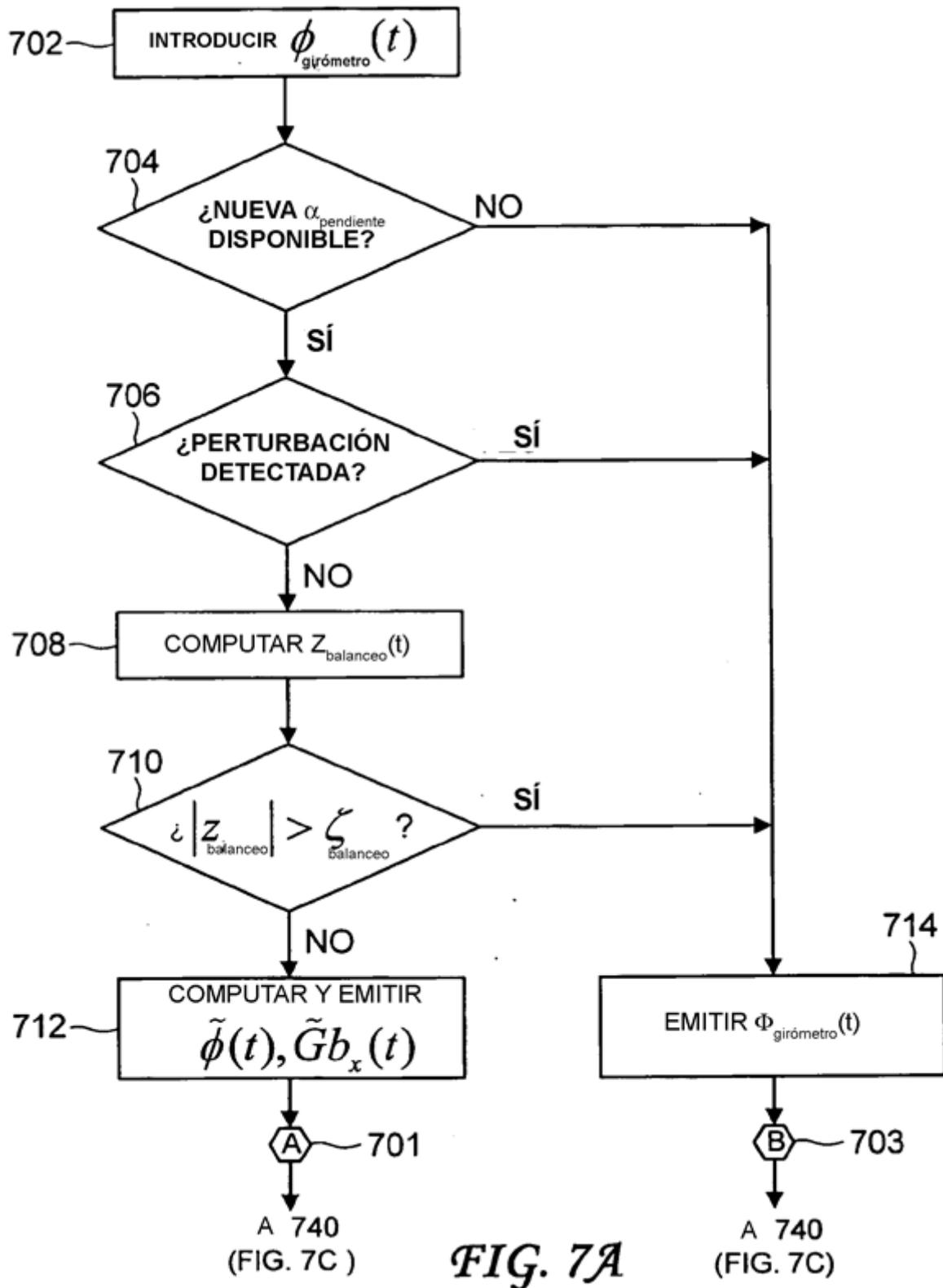


FIG. 6B



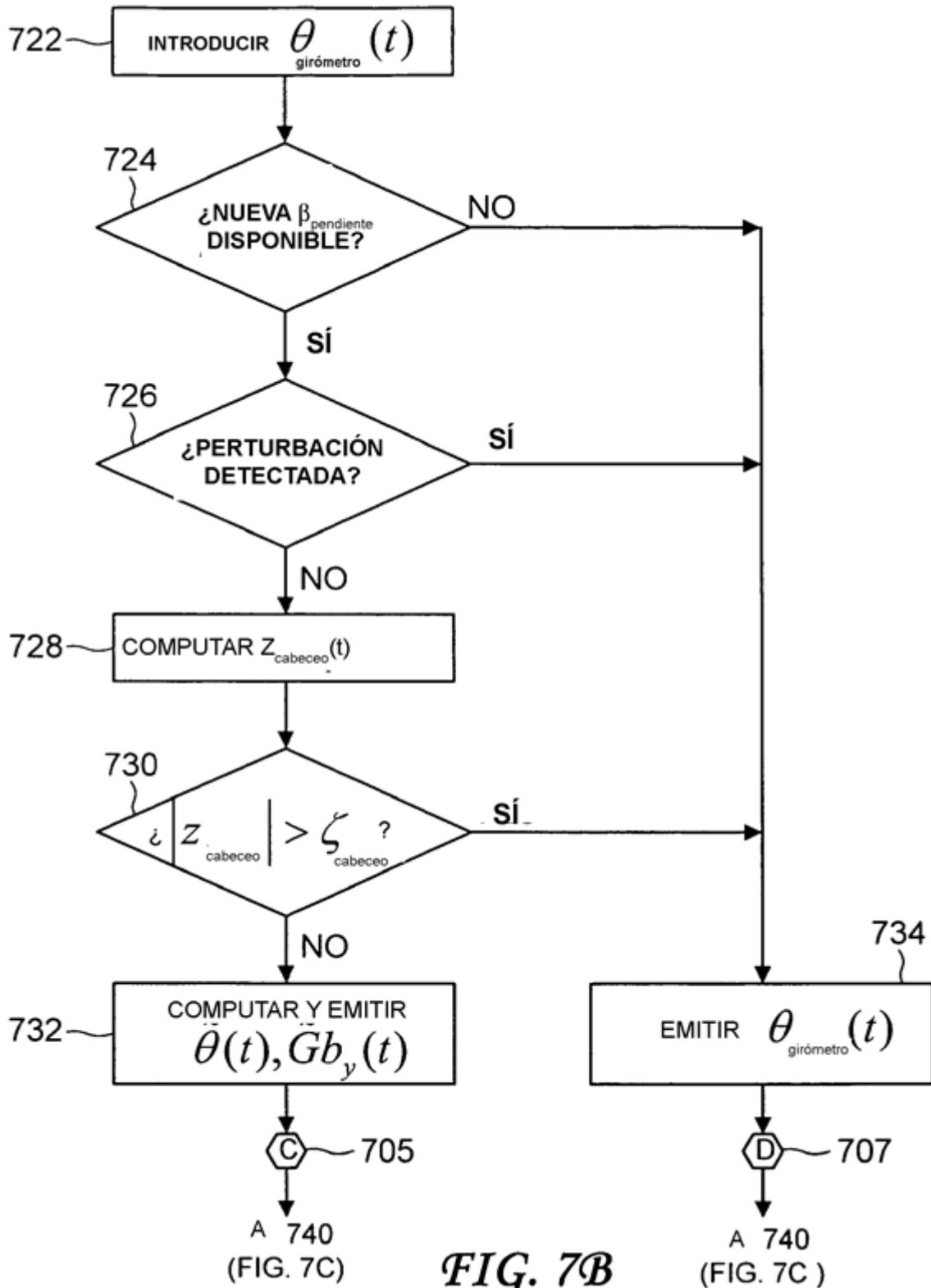
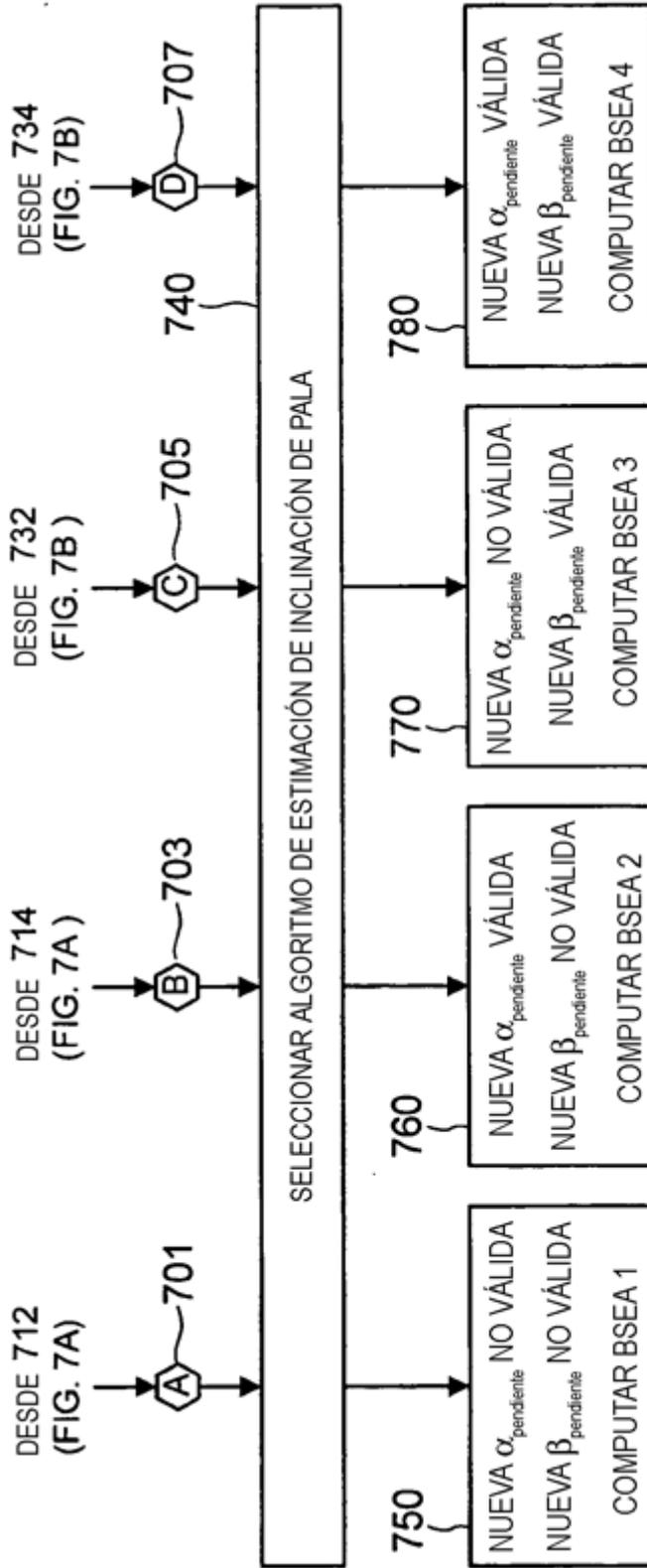


FIG. 7B



**FIG. 7C**

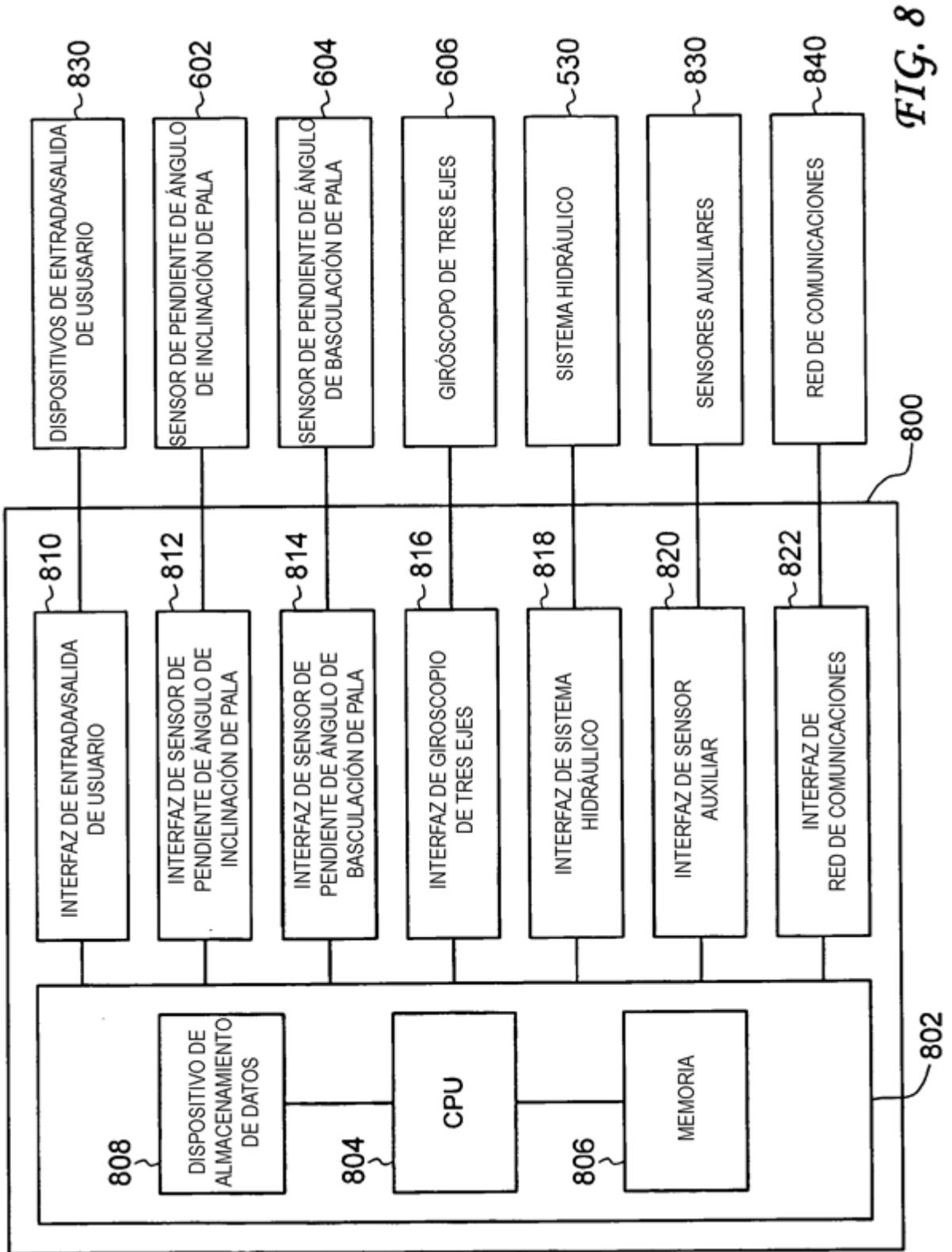


FIG. 8